



BACHELORARBEIT

Herr
Danny Hillig

**Innovationen und
Möglichkeiten der
LED-Farbsteuerung
-am Beispiel des
x7-Farbmischsystems**

2014

BACHELORARBEIT

Innovationen und Möglichkeiten der LED-Farbsteuerung -am Beispiel des x7-Farbmischsystems

Autor:
Herr Danny Hillig

Studiengang:
Medientechnik

Seminargruppe:
MT10wH-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schmalwasser

Zweitprüfer:
Dipl.-Ing. Ulrich Kunkel

Einreichung:
Mittweida, 24.07.2014

BACHELOR THESIS

Innovations and potentialities of led-color control - Exemplified by x7 Color System

author:

Mr. Danny Hillig

course of studies:

media technology

seminar group:

MT10wH-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schmalwasser

second examiner:

Dipl.-Ing. Ulrich Kunkel

submission:

Mittweida, 24.07.2014

Bibliografische Angaben

Danny Hillig

Innovationen und Möglichkeiten der LED-Farbsteuerung

- am Beispiel des x7-Farbmischsystems

Innovations and potentialities of led-color control

- Exemplified by x7 Color System

49 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2014

Abstract

Diese Arbeit enthält Erkenntnisse über das Verhalten eines innovativen Farbmischsystems mit Leuchtdioden. Dazu wurden LED-Scheinwerfer mit dem x7-Farbmischsystem der Firma ETC mit einem konventionellen Scheinwerfertyp verglichen. Mithilfe des Messverfahrens der Spektralanalyse wurden zahlreiche Messergebnisse gesammelt. In dieser Arbeit werden die Messungen ausgewertet und grafisch dargestellt. Für die Erschließung der Thematik wird im Vorfeld auf Grundlagen des Lichts und der LED-Technologie eingegangen. Anschließend wird das System vorgestellt und die Technik dahinter beschrieben. Abschließend führt eine Zusammenfassung zu der Erkenntnis, dass dieses neuartige Farbmischsystem trotz des enormen Potentials gerade im Leistungsbereich noch erhebliche Schwächen besitzt. Allerdings werden die Versuche die Vorteile der LED-Scheinwerfer im Farbverhalten und der vielseitigen Möglichkeiten des Mischsystems beleuchten.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelverzeichnis.....	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen des optischen Lichts.....	2
2.1 Das Sehen von Licht.....	3
2.1.1 Lichtwahrnehmung.....	4
2.2 Licht im physikalischen Sinne.....	5
2.2.1 Eigenschaften von Licht	6
2.3 Farben	7
2.3.1 Farbmischsysteme.....	8
2.3.2 CIE-Normfarbtafel	10
2.3.3 Farbtemperatur	12
2.3.4 Wirkung von Farben.....	13
2.4 Wichtige physikalische Größen	14
3 Grundlagen der LED-Technologie	17
3.1 Funktionsprinzip einer LED	18
3.2 Entwicklungen in der LED-Geschichte	19
3.3 Typen von Leuchtdioden.....	21
3.4 Farbwiedergabe von Leuchtdioden	22
4 Stand / Notwendigkeit.....	24
5 Untersuchung des 7-Farbmischsystems.....	25
5.1 Die Vergleichsmethode	25
5.2 Der Versuchsaufbau	26
5.2.1 Der Versuchsablauf	27
5.3 Das Messverfahren	28
5.4 Das x7-Farbmischsystem von ETC	31
5.4.1 Die LED-Technik der Selador-Serie	32

5.5	Technische Parameter / Preis	36
5.6	Der Farbvergleich.....	37
5.6.2	Zusammenfassung des Farbvergleiches.....	44
5.7	Der Weißvergleich.....	45
5.8	Das Dimmverhalten.....	47
6	Fazit.....	48
	Literaturverzeichnis	XI
	Anhangverzeichnis	XV
	Anhang.....	XVI
	Eigenständigkeitserklärung	XXVI

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
As	Arsen
B	Bor
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
CCT	Correlated Colour Temperature
cd	Candela
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
CMY	Cyan-Magenta-Yellow
COB	Chip on Board
CRI	Colour Rendering Index
CTB-Filter	Change to blue Filter
CTO-Filter	Change to orange Filter
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
ETC	Electronic Theatre Controls
etc.	et cetera
HSV	Hue Saturation Value
HLS	Hue Lightness Saturation
HMI	Halogenmetall dampflampe (Hydrargyrum Metall Iodide)
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LED	light-emitting diode
lm	Lumen
n-dotiert	negativ dotiert
nm	Nanometer
PAR	parabolic aluminized reflector
p-dotiert	positiv dotiert
P-N-Übergang	Positiv-Negativ-Übergang
SD-Karte	Secure Digital Memory Card
SMD	Surface Mount Device
RGB	Rot-Grün-Blau
RGBW	Rot-Grün-Blau-Weiß
RGBWA	Rot-Grün-Blau-Weiß-Amber
u.a.	und andere
UCS	Uniform Chromity Scale
UPRtek	United Power Research Technology Corporation
z.B.	zum Beispiel

Formelverzeichnis

Formel 1: elektrischer Widerstand (Ohmsches Gesetz).....	14
Formel 2: elektrische Leistung.....	14
Formel 3: Lichtstrom.....	14
Formel 4: Lichtstärke.....	15
Formel 5: Leuchtdichte.....	15
Formel 6: Lichtmenge.....	15
Formel 7: Beleuchtungsstärke.....	16
Formel 8: Berechnung der Normfarbwerte X,Y,Z.....	29
Formel 9: Berechnung der Normfarbwertanteile x und y.....	29
Formel 10: Berechnung des Farbortes in der CIE UCS 1976 Farbtafel.	29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lichtempfindliche Sinneszellen des Menschen.	3
Abbildung 2: Optisches Lichtspektrum im elektromagnetischen Strahlungsbereich.	5
Abbildung 3: Spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfentypen.	7
Abbildung 4: Prinzip der additiven Farbmischung.	8
Abbildung 5: Prinzip der subtraktiven Farbmischung.	9
Abbildung 6: CIE-Normfarbtafel (1931).	11
Abbildung 7: CIE-UCS-Farbtafel.	11
Abbildung 8: Beispiele verschiedener Farbtemperaturen (in Kelvin).	12
Abbildung 9: Aufbau einer Leuchtdiode.	18
Abbildung 10: Aufbau einer COB-LED.	22
Abbildung 11: LED-Farben im CIE-Farbraum.	23
Abbildung 12: Versuchsaufbau der Vergleichsmethode.	27
Abbildung 13: LED-Spektrometer der Firma UPRtek.	30
Abbildung 14: Messergebnisse des LED-Meters kompakt als Bild-Datei.	30
Abbildung 15: ETC-Selador-LED-Bestückung (links: VIVID, rechts: LUSTR+).	31
Abbildung 16: LED-Spektren der Selador-Serie (links: weiß, indigo; rechts: blau, cyan).	33
Abbildung 17: LED-Spektren der Selador-Serie (links: grün, amber; rechts: rot-orange, rot).	34
Abbildung 18: ETC-Halogen-PAR (links) und ETC-LED-Scheinwerfer.	37
Abbildung 19: Die ROSCO-Farbe 101 im direkten Vergleich (v.r.Halogen, VIVID, LUSTR+).	39
Abbildung 20: Intensitätsunterschiede (links: LED-ETC, rechts: Halogen-ETC).	44
Abbildung 21: Spektralanalyse von "Warmweiß" im Vergleich.	45
Abbildung 22: Spektralanalyse von "Kaltweiß" im Vergleich.	46
Abbildung 23: Farbwerte/Farborte der LEDs der VIVID-Bestückung.	XVI
Abbildung 24: Farbwerte/Farborte der LEDs der LUSTR+-Bestückung.	XVII
Abbildung 25: Farbvergleich von ROSCO 119.	XVIII
Abbildung 26: Farbvergleich von ROSCO 174.	XVIII
Abbildung 27: Farbvergleich von ROSCO 728.	XIX
Abbildung 28: Farbvergleich von ROSCO 124.	XIX
Abbildung 29: Farbvergleich von ROSCO 122.	XX
Abbildung 30: Farbvergleich von ROSCO 101.	XX
Abbildung 31: Farbvergleich von ROSCO 179.	XXI
Abbildung 32: Farbvergleich von ROSCO 156.	XXI
Abbildung 33: Farbvergleich von ROSCO 110.	XXII
Abbildung 34: Farbvergleich von ROSCO 106.	XXII
Abbildung 35: CIE-Normfarbtafeln des "Warmweiß-Vergleichs".	XXIII
Abbildung 36: CIE-Normfarbtafeln des "Kaltweiß-Vergleichs".	XXIII
Abbildung 37: Der "Kaltweiß-Vergleich" von VIVID-ETC (links) und Halogen-ETC.	XXIV
Abbildung 38: Der "Kaltweiß-Vergleich" von LUSTR+-ETC (links) und Halogen-ETC.	XXIV
Abbildung 39: Vergleich der Spektren des RGB- und des x7-Farbmischsystems. ...	XXV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Normlichtarten.	7
Tabelle 2: Empfindung und Wirkung von Farben.	14
Tabelle 3: Zustände von Leuchtdioden.	19
Tabelle 4: Stationen der LED-Entwicklung.	20
Tabelle 5: LED-Bestückung der ETC-Selador-Typen VIVID und LUSTR+.	32
Tabelle 6: Angaben aus der Spektralanalyse der ETC-LED-Scheinwerfer VIVID und LUSTR+.	35
Tabelle 7: Technische Angaben der LED-Scheinwerfer.	36
Tabelle 8: Verwendete ROSCO-Farbfiler.	38
Tabelle 9: Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessungen in lux.	40

1 Einleitung

Die Erfindung der Leuchtdiode war ein wichtiger Schritt für die Entwicklung nachhaltiger Beleuchtungstechnik. Mittlerweile hat die LED-Beleuchtung bereits unseren Alltag erobert und löst in vielen Bereichen die herkömmliche, mit großen Verlusten behaftete Lichttechnik ab. Die Entwicklung der kleinen Lichtquellen scheint kein Ende zu nehmen. Heute werden Leuchtdioden produziert, die verschiedene Farben abgeben und mit einer Lichtausbeute überzeugen, die bei gleichem Stromverbrauch jede Glühlampe "in den Schatten stellen".

Der unschlagbare Wirkungsgrad kann jedoch nicht über die Nachteile dieser Lichttechnik hinwegtäuschen. Es ist schwer diese Lichtquelle zu standardisieren. Die Qualität des abgestrahlten Lichts formt sich aus ganz anderen Parametern, als bei konventioneller Beleuchtung. Alle technischen Eigenschaften werden stetig verbessert. Verschiedenste Konzepte versuchen bisherige Probleme zu beheben und neue Ideen umzusetzen.

Ein solches innovatives Konzept wurde mit dem x7-Farbmischsystem entwickelt und durch die Firma ETC mit der Selador-LED-Scheinwerfer-Serie umgesetzt. Die Untersuchung dieses Systems soll Gegenstand dieser Arbeit sein. Dabei soll die Annahme erörtert werden, ob mit dem x7-Farbmischsystem eine LED-Technik entwickelt wurde, die ein gleichartiges Farbverhalten wie konventionelle Scheinwerfer mit Farbfiltern besitzt und ob die Technik der ETC-Selador-Serie vergleichbare Ergebnisse wie ein ETC-Halogen-PAR-Scheinwerfer erzielen kann.

Da die Beurteilung jeglicher Lichttechnik die Folge unseres Seheindrucks ist und Farben in unserem Leben eine nicht unerhebliche Rolle spielen, wird in den ersten Kapiteln auf die Grundlagen des Lichts eingegangen. Zudem wird für das bessere Verständnis die Physik hinter der Leuchtdiode beschrieben. Anschließend wird die Untersuchung des Farbsystems ausgewertet, wofür ein wissenschaftlicher Vergleich durchgeführt wurde. Ein Fazit soll am Ende klären, welches Potential diese Technik auf dem Beleuchtungstechnik-Markt besitzt.

Die Beleuchtung in kulturellen Bereichen wie der Veranstaltungstechnik, dem Fernseh-Gewerbe oder der Theaterbranche besteht aus sämtlichen Technologien der bisher entwickelten künstlichen Lichtquellen. Leuchtdioden stoßen hier schnell an ihre Grenzen. Dennoch ist der Trend hin zur LED erkennbar und nicht selten wird diese Technologie mit überzeugenden Ergebnissen eingesetzt. In dieser Arbeit wird untersucht, ob eine weitere Innovation den LED-Markt bereichern kann und eine effiziente Alternative gegenüber konventionellem Licht darstellt.

2 Grundlagen des optischen Lichts

Wir nutzen es Tag und Nacht. Wir können es aufgrund natürlichen Ursprungs verwenden und wir haben gelernt es unabhängig von Tag und Nacht elektrisch zu erzeugen. Es kann aus unterschiedlichsten Quellen gewonnen werden und findet überall den von uns speziell gewünschten Einsatz. Licht ist ein Grundelement unserer Existenz. Ohne Licht wäre unser Leben auf der Erde nicht möglich. Es ist so allgegenwärtig, dass wir uns selten Gedanken über den Ursprung dieses wichtigen Gutes machen.

Licht ist pure Energie, welche uns die Sonne tagtäglich spendet und die den Motor unseres Handelns antreibt. Lichtquellen sind gleichzeitig auch Wärmequellen.¹

Wir sind vom Licht abhängig. Zudem ist es viel mehr als ein einfaches physikalisches Gut, was uns das Sehen ermöglicht. Durch unterschiedliche Lichtfarben sehen wir die Welt bunt. Wir können mit Licht gestalten. Licht lässt uns kreativ werden und ist eine wichtige künstlerische Inspiration.

Die Beleuchtungsbranche ist ein enormer Wirtschaftsfaktor. Es werden Lichtfestivals veranstaltet und überall auf der Erde verehren die Menschen die Sonne. Rein elementar betrachtet ist unser sichtbares Licht nur ein kleiner Teil einer elektromagnetischen Strahlung.

In diesem einleitenden Teil meiner Arbeit möchte ich die grundlegenden Fakten zum Thema Licht darlegen. Diese Informationen sollen die Basis für meine Arbeit mit LED-Leuchtmitteln sein und sind essentiell für die Bewertung von verschiedenen und neuartigen Beleuchtungstechniken. Ganz egal welche Lichtquellen auch mit welcher Intensität, welchem Wirkungsgrad und welchen technischen Möglichkeiten noch entwickelt werden, können wir Menschen doch nur jene Gegebenheiten sehen, welche wir durch unsere Augen aufnehmen und über unser Gehirn verarbeiten können.

¹ Vgl. Bewer, Steckmann, 2004: S.22

2.1 Das Sehen von Licht

Was ist Licht eigentlich für uns?

Licht ist: „Der winzige Ausschnitt aus dem Gesamtspektrum der elektromagnetischen Wellen, für den wir einen Empfangsapparat besitzen.“²

Unterschiedlichste Lichtquellen senden ein breites Spektrum an elektromagnetischen Wellen aus. Diese Vorgänge entsprechen der natürlichen Physik und lassen sich vom Menschen nicht beeinflussen. Lebewesen reagieren auf diese Lichtquellen unterschiedlich und haben sich im Laufe der Evolution in Beziehung zum Licht entwickelt. Pflanzen produzieren mit Hilfe von Licht über die Photosynthese den für uns lebensnotwendigen Sauerstoff.

Wir Menschen besitzen speziell entwickelte Sinneszellen, die bei Lichteinfall reagieren und die Reize zum Gehirn weiterleiten, wo wiederum komplexe Verarbeitungsvorgänge stattfinden, die es uns ermöglichen zu Sehen und das Gesehene zu verarbeiten.

Ein großer Teil der lichtempfindlichen Zellen im hinteren Bereich des Auges, besteht im Wesentlichen aus zwei Rezeptoren. Über die so genannten Zapfen können wir Farbunterschiede wahrnehmen. Helligkeitsunterschiede erkennen wir über die Stäbchen.³

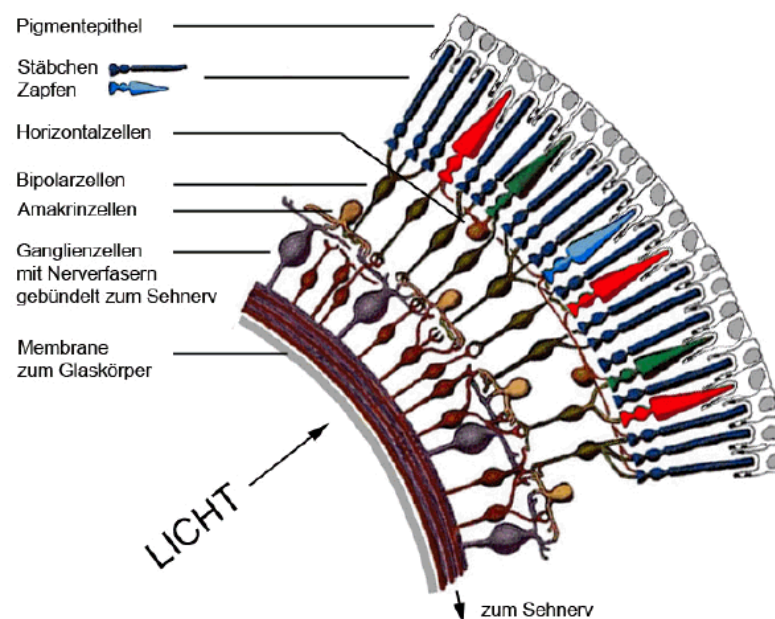


Abbildung 1: Lichtempfindliche Sinneszellen des Menschen.⁴

² <http://www.farbmetrik-gall.de/wasist/licht/index.html> [Stand: 15.04.2014]

³ Vgl. http://www.color-security.de/html/licht_auge.html [Stand: 15.04.2014]

⁴ <http://www.dma.ufg.ac.at/assets/16457/intern/retina.jpg>

Über drei unterschiedliche Arten von Zapfen, welche in gegenseitiger Wechselwirkung stehen, werden je nach Reizerfüllung Informationen für die Farben Rot, Grün und Blau (RGB) über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet (siehe Abb. 1). Farbeindrücke von anderen Farben werden erst im menschlichen Gehirn verarbeitet. Der Farbeindruck Gelb entsteht zum Beispiel durch die Ansprache der Zapfen, welche Grün und Rot melden. (siehe 2.3.1 Farbmischsysteme).⁵

Das Auge ist der Empfangsapparat, welcher die Farbinformationen über das Licht aufnimmt. Der Eindruck der Farbe entsteht bei der Auswertung des Lichtes im Gehirn.

Unser farbliches Sehen ist das Ergebnis einer Kette aus Ursachen und Wirkungen. Diese Kette besteht aus der Lichtquelle, dem bestrahlten Objekt, welche das Licht wie ein Prisma in verschiedene Farbanteile zerlegt und unserem Auge zusammen mit dem Gehirn.⁶

2.1.1 Lichtwahrnehmung

Unser komplex aufgebautes Auge ist ein sehr sensibles Sinnesorgan. Wir können viele Eigenschaften des Lichtes analysieren und sind in der Lage die Qualität der Lichtquelle über die Analyse vieler Parameter zu beurteilen.

Wir besitzen die sogenannte Fähigkeit der Adaption, d.h. wir können in einem enormen Bereich Leuchtdichten (siehe 2.4. Wichtige physikalische Größen) zwischen 10^{-6} cd/m² und 10^5 cd/m² unterscheiden. Wir empfinden jede Lichtquelle anders und ziehen über die Intensität, Größe und Helligkeit Rückschlüsse über die Entfernung.

Es ist nachgewiesen, dass unsere Augen verschiedene Spektralanteile des sichtbaren Lichtes unterschiedlich intensiv wahrnehmen. Grün-gelbes Licht mit einer Wellenlänge von 555 Nanometern (nm) sehen wir viel heller als violettes (380 nm) oder rotes Licht (720 nm). Diese differenzierte Helligkeitsempfindung müssen wir bei der Konzipierung unserer Lichtquellen berücksichtigen. Gerade im künstlerischen Bereich darf man diese natürliche Eigenschaft unserer Augen nicht unterschätzen.

Zudem unterscheiden wir zwischen hartem und weichem Licht. Hartes Licht entsteht aus punktförmigen Lichtquellen ohne Linsen oder Diffusoren. Die Schatten sind in hartem Licht klar definiert und Oberflächen lassen sich deutlich erkennen. Weiches Licht entsteht durch eine Oberflächenvergrößerung der Lichtquelle und durch Diffusoren, in der Natur zum Beispiel Wolken, welche das Licht streuen.⁷

⁵ Vgl. <http://www.farbmetrik-gall.de/wasist/auge/index.html> [Stand: 15.04.2014]

⁶ Vgl. <http://www.farbmetrik-gall.de/wasist/ursachewirkung/index.html> [Stand: 15.04.2014]

⁷ Vgl. Bewer, Steckmann: 2004, S. 39 - 41

2.2 Licht im physikalischen Sinne

Physikalisch betrachtet ist Licht eine elektromagnetische Strahlung. Diese entsteht in der Natur bei der Umwandlung von Atomkernen, wie bei der Sonne, durch die Verbrennung von chemischer Energie, wie bei der Flamme eines Feuers oder bei der Umwandlung von elektrischer Energie. Letztere physikalische Grundlage hat sich der Mensch zu Nutze gemacht um künstliche Lichtquellen zu erzeugen wie die Glühlampe oder die Leuchtdiode.⁸

Bei einer Vielzahl von elektromagnetischen Strahlungen ist das Licht, welches wir mit unserem Sehsinn empfangen in einem schmalen Wellenlängen-Spektrum angesiedelt. Begrenzt durch die Infrarotstrahlung ($>720\text{nm}$) und die Ultraviolette Strahlung ($<380\text{nm}$) existiert der Bereich des sichtbaren Farbspektrums. Wir sehen also das komplette Farbbild in Form von weißem Licht wenn elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von 380 nm bis 720 nm auf uns treffen (siehe Abb. 2).

Unterschiedliche Farben sehen wir, wenn das Licht mit seinem vollständigen Farbspektrum durch Objekte und deren Oberflächen gebrochen oder in seine Spektralanteile zerlegt wird. Eine sehr gleichmäßige Aufteilung des weißen Lichtes in seine Spektralfarben erreicht man zum Beispiel durch den Einsatz eines Prismas.⁹

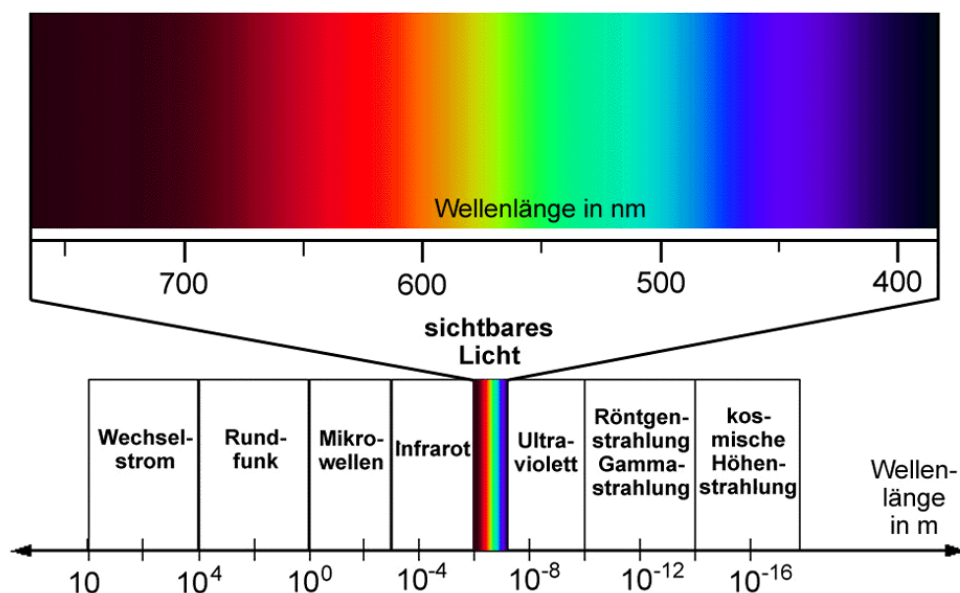


Abbildung 2: Optisches Lichtspektrum im elektromagnetischen Strahlungsbereich.¹⁰

⁸ Vgl. <http://www.seilnacht.com/Lexikon/Licht.htm#Optisches%20Spektrum> [Stand: 20.04.2014]

⁹ Vgl. Bewer, Steckmann, 2004: S.21/22

¹⁰ <http://www.seilnacht.com/Lexikon/spektrum.html>

2.2.1 Eigenschaften von Licht

Licht breitet sich allseitig, geradlinig und sehr schnell aus. Mit einer Geschwindigkeit von 300 000 Kilometern pro Sekunde ist es die höchste bisher gemessene Geschwindigkeit.

Zudem verhält sich Licht wenn es auf Medien trifft nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten. Je nach Material des bestrahlten Objektes, wird Licht absorbiert. In diesem Falle werden bestimmte Wellenlängenbereiche der Lichtstrahlung umgeformt und als andere elektromagnetische Strahlungsarten wieder abgegeben. Ein Beispiel hierfür ist der natürliche Treibhauseffekt der durch die Wechselbeziehung zwischen Sonne und Erde auftritt.

Eine weitere Eigenschaft des Lichtes ist die Reflexion. Beim Auftreffen auf ein Medium werden je nach Beschaffenheit der Oberfläche und der Materie, bestimmte Bereiche der Lichtstrahlen mehr oder weniger zurück geworfen. Einfallswinkel ist dabei immer auch gleich Ausfallswinkel der Strahlen. Beim Auftreffen auf transparente Körper können wir die Eigenschaft der Brechung des Lichtes beobachten. Je nach Dichte des Materials verändern die Lichtstrahlen ihren Einfallswinkel. Diese Eigenschaft wird in der Beleuchtungsbranche durch den Einsatz von Linsensystemen genutzt.

Je nach Einsatz der Linse werden die Lichtstrahlen divergent, konvergent oder diffus gebrochen. Bestimmte Anwendungen dieser eben genannten Eigenschaften werden als Dispersion und Interferenz bezeichnet, wodurch unterschiedliche Lichtanteile unterschiedlich gebrochen, reflektiert oder absorbiert werden.¹¹

Licht kann zudem mit weiteren Eigenschaften zur genaueren Einordnung beschrieben werden (siehe dazu 2.4. Wichtige physikalische Größen). Jede Lichtquelle hat außerdem ganz spezielle Merkmale und ein charakteristisches Verhalten mit Vorteilen und Nachteilen je nach Einsatzgebiet. Künstliche Lichtquellen werden daher in bestimmte Normlichtarten unterteilt (siehe Tab.1).

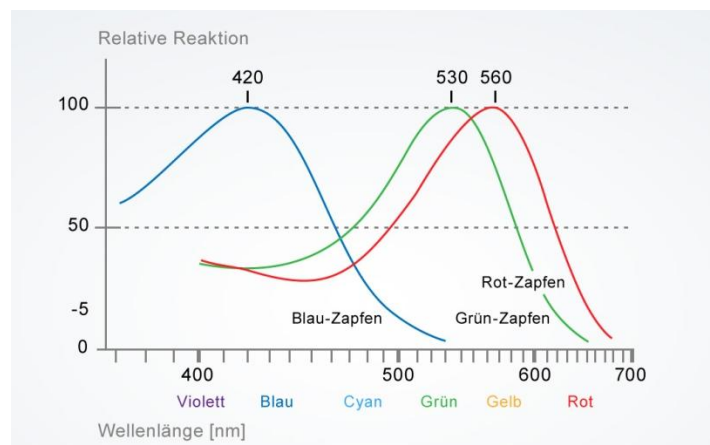
¹¹ Vgl. <http://www.mineralienfreunde.de/AGM/013.pdf> [Stand: 05.05.2014]

Normlichtart A (2855,6 K)	typische Glühlampenbeleuchtung
Normlichtart B (4874 K)	direktes Sonnenlicht
Normlichtart C (6774 K)	mittleres Tageslicht
Normlichtart D55 (5500 K)	Himmelslicht bei Sommersonne
Normlichtart D65 (6500 K)	ersetzt Normlicht C
Normlichtart D75 (7500 K)	tiefblauer Nordhimmel

Tabelle 1: Normlichtarten.¹²

2.3 Farben

Bestimmte Spektralanteile der elektromagnetischen Strahlung, die wir als Licht bezeichnen, sehen wir als unterschiedliche Farben. Wir sind in der Lage eine Vielzahl von Farbtönen zu unterscheiden. Trifft eine Lichtquelle mit einem breiten Farbspektrum auf einen Gegenstand, werden bestimmte Spektralanteile des Lichtes herausgefiltert und das Objekt erscheint uns in der Spektralfarbe, welche bestehen bleibt. Wie zu Beginn erwähnt nehmen wir die unterschiedlichen Wellenlängenbereiche des sichtbaren Lichtes mit bestimmten Sinneszellen hinter unserer Netzhaut auf und verarbeiten diese Reize im Gehirn. Im Wesentlichen reagieren drei spezielle Arten von Zapfen auf einen ganz bestimmten Spektralbereich überempfindlich (siehe Abb. 3). Der erste Zapfentyp wird von blauem Licht mit einer Wellenlänge von 420 nm, der zweite von grünem Licht mit einer Wellenlänge von 530 nm und der dritte von rotem Licht mit einer Wellenlänge von 560 nm optimal angeregt.¹³

Abbildung 3: Spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfentypen.¹⁴

¹² Vgl. Mueller, 2008: S.85

¹³ Vgl. <http://dasgehirn.info/wahrnehmen/sehen/von-staebchen-und-zapfen> [Stand: 07.05.2014]

¹⁴ <http://dasgehirn.info/wahrnehmen/sehen/spektrale-empfindlichkeit-der-zapfen-typen/index.html>

Alle anderen Farben sehen wir aufgrund komplexer biochemischer Vorgänge, welche zwischen den Sinneszellen und unserem Kopf stattfinden. Diese Vorgänge sind alters-, geschlechts- und formabhängig.

2.3.1 Farbmischsysteme

Wir sind in der Lage bis zu 7 Millionen Farben zu unterscheiden. Gleiche Farbeindrücke können dabei in unserem Gehirn durch verschiedene Reize hervorgerufen werden. Dabei unterscheiden wir die additive Farbmischung nach dem RGB-Farbmodell von der subtraktiven Farbmischung nach dem CMY-Farbmodell.¹⁵

Additive Farbmischung

Diesem Farbmischsystem liegen die Primärfarben Rot, Grün und Blau zu Grunde, jene, für die wir auch Rezeptoren in Form von bestimmten Zapfentypen hinter der Netzhaut besitzen. Mischt man diese drei Grundfarben zu gleichen Teilen, erhält man Weiß. Werden nur zwei Farben kombiniert, erhält man eine Grundfarbe des subtraktiven Farbmischsystems, welche auch als Komplementärfarbe oder Sekundärfarbe bezeichnet wird (siehe Abb. 4). Das Prinzip der additiven Farbmischung über das RGB-Modell wurde bisher bei der Farbsteuerung von LED-Lichtquellen eingesetzt, wobei die Ergebnisse allerdings fehlende Bereiche im Farbspektrum aufwiesen. Neue Farbmodelle wie das x7-Farbmischsystem versprechen Verbesserungen der Probleme (siehe 5.4. Das x7-Farbmischsystem der Firma ETC).¹⁶

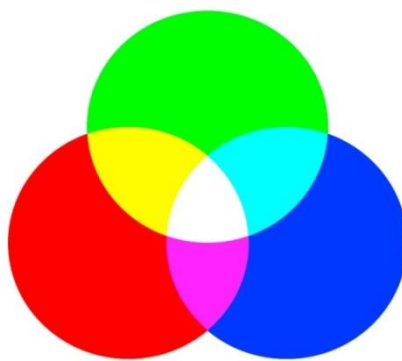


Abbildung 4: Prinzip der additiven Farbmischung.¹⁷

¹⁵ Vgl. Mueller, 2008: S.61

¹⁶ Vgl. Mueller, 2008: S. 65

¹⁷ http://blog.printsolution-gmbh.de/wp-content/uploads/2012/11/Farbmischung_addi.jpg

Subtraktive Farbmischung

Bei diesem Farbmischsystem entstehen Farben durch Herauslöschten bestimmter Wellenlängen aus dem Lichtspektrum. Mischt man die drei Grundfarben Cyan, Magenta und Gelb dieses Systems zusammen, erhält man die unbunte Farbe Schwarz, d.h. alle Wellenlängen sind aus dem Lichtspektrum entfernt worden. Alle anderen Farben können über die Mischung von CMY hergestellt werden. Mischt man zwei der drei Grundfarben zusammen, erhält man analog zur additiven Farbmischung eine jeweilige Komplementärfarbe und damit eine additive Grundfarbe (siehe Abb. 5). Durch subtraktive Farbmischung entstandene Farben sehen wir in Form von Körperfarben. Bestimmte Spektralbereiche des auftreffenden Lichtes werden, je nach Beschaffenheit der Oberfläche des Körpers, reflektiert oder absorbiert.¹⁸

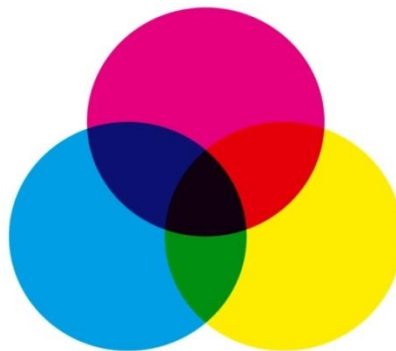


Abbildung 5: Prinzip der subtraktiven Farbmischung.¹⁹

Neben den RGB/CMY-Farbmodellen wird das HSV-Farbmodell und das HSL-Farbmodell genutzt. Während erstere hardwareorientiert arbeiten, basieren letztere eher auf den Mischverhältnissen eines Malers. HSV/HSL-Farbmodelle richten sich somit eher an der menschlichen Empfindung aus.²⁰

¹⁸ Vgl. Mueller, 2008: S.67

¹⁹ http://blog.printsolution-gmbh.de/wp-content/uploads/2012/11/Farbmischungen_sub.jpg

²⁰ Vgl. Mueller, 2008: S.69/70

2.3.2 CIE-Normfarbtafel

Um eine definierte Darstellung aller empfindungsgemäßen Farben, welche vom Menschen wahrgenommen werden können zu erhalten, hat sich die internationale Beleuchtungskommission (CIE) auf die CIE-Normfarbtafel geeinigt.²¹ Diese Methode der Farberkennung basiert auf der additiven Farbmischung. Somit bedient sich die CIE der Dreifarbentheorie und legt der Normtafel folgende RGB-Primärvalenzen zu Grunde:

Blau (B): 435,8 nm (Z)

Grün (G): 546,1 nm (G)

Rot (R): 700 nm (X)

Über diese festgelegten Werte wird ein farbmesstechnischer Normalbetrachter definiert.²² Für die virtuelle Betrachtung wurde das XYZ-Farbmischsystem mit den CIE-Normfarbwerten eingeführt. X steht dabei für Rot, Y für Grün und Z für Blau. Diese Werte lassen sich linear transformieren und ergeben anschließend wieder die reellen RGB-Primärfarben. Über die Normfarbwerte X, Y und Z erhalten wir Informationen über Helligkeit, Farbton und Sättigung der Farbe.²³

Die CIE-Normfarbtafel zeigt uns eine Fläche, in der wir jede beliebige Farbe über die x-y-Koordinate ablesen können (siehe Abb. 6). Den Wert der z-Koordinate können wir folglich über die Beziehung $1=x+y+z$ errechnen und über ein Farbdreieck in dem zweidimensionalen x-y-Koordinatensystem darstellen. Somit lässt sich jede beliebige Farbe über die drei Werte definieren und darstellen. In der Mitte der Farbtabelle finden wir den Weißpunkt, welcher auch als "Unbuntpunkt" bezeichnet wird. In diesem Punkt sind alle Farben entsättigt. Er besitzt die Koordinaten $x=y=z=0,33$.

Ermitteln wir die Normfarbwertanteile x und y für alle Wellenlängen, so erhalten wir den Planck'schen Kurvenzug, der auch als Black-Body-Kurve bezeichnet wird (siehe Abb. 6).²⁴ Diese Kurve zeigt den Farbverlauf als Temperatur eines idealen Strahlers (schwarzer Körper oder Planck'scher Strahler).²⁵

Die Betrachtung der Farbvalenzen hängt wesentlich von der Gesichtsfeldgröße des Betrachters ab. Dazu definiert die internationale Beleuchtungskommission verschiedene Normalbeobachter. Näher spezifiziert werden diese in der DIN 5033, Teil 2.²⁶ Oft nutzen wir die CIE 1931 und die CIE 1976 (siehe Abb. 6/7).

²¹ Vgl. Mueller, 2008: S73

²² Vgl. Dietze, 2014: S6

²³ Vgl. Mueller, 2008, S.72

²⁴ Ebd.

²⁵ Vgl. <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/opto/articles/256261/index4.html> [Stand:12.05.2014]

²⁶ Ebd.

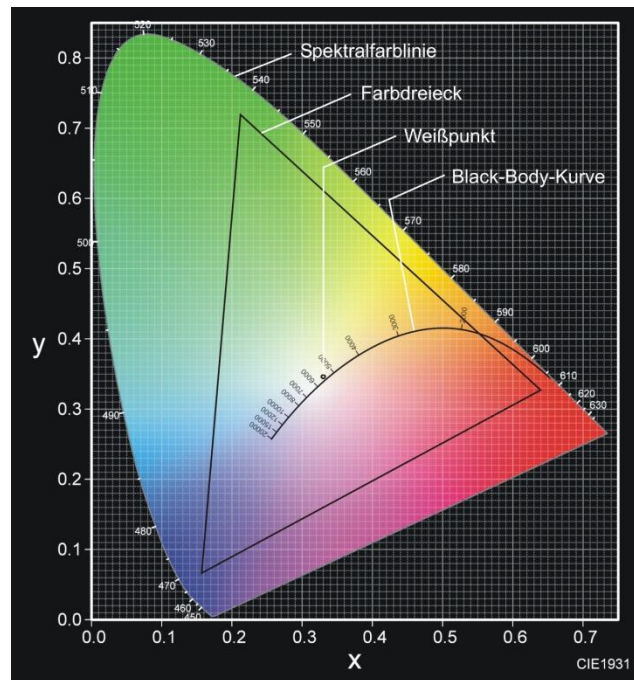


Abbildung 6: CIE-Normfarbtafel (1931)²⁷

CIE-UCS-Farbtafel

Diese Farbtafel dient als Kompromiss, um Farben empfindungsgemäß darzustellen. Die Farbwerte sind bei der CIE-UCS-Farbtafel über die Koordinaten u' und v' abzulesen. Diese lassen sich aus den x-/y-Koordinaten der CIE-Normfarbtafel transformieren. Diese Farbtafel wird wegen des Einführungsjahres auch als CIE 1976 bezeichnet.²⁸

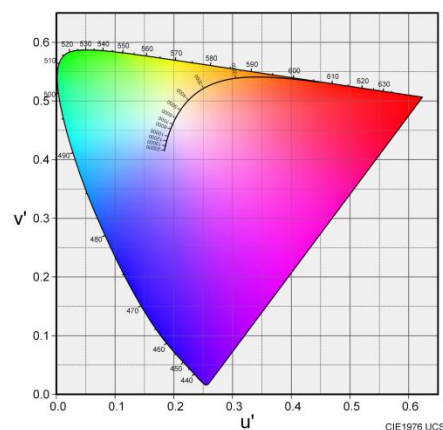


Abbildung 7: CIE-UCS-Farbtafel.²⁹

²⁷ http://n-colorspace.cool.coocan.jp/imgData/CIE1931_F2_BKa.png

²⁸ Vgl. Mueller, 2008: S.75

²⁹ http://n-colorspace.cool.coocan.jp/imgData/CIE1976UCS_F2a.png

2.3.3 Farbtemperatur

Die Farbtemperatur einer Lichtquelle ist ein weiterer Parameter, der uns hilft die Art des Lichtes einzuordnen. Über die Farbtemperatur können wir die Farbe des Lichtes in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur angeben. Grundlage für diese Einteilung sind die Ergebnisse, die wir beim Erhitzen von Metallen sehen können.

Je nach Erwärmungsgrad nehmen Metalle, auch als schwarze Körper bezeichnet, unterschiedliche Farben an. Kalte Körper strahlen im infraroten Spektralbereich, weshalb wir auch keine Farbe wahrnehmen. Durch das Erhitzen beginnt das Metall rot zu glühen. Führen wir weiter Wärme zu, können jene Körper gelb, weiß oder sogar blau glühen. Die einzelnen Farbtemperaturen lassen sich in den Black-Body-Kurven definiert ablesen (siehe Abb.6/7).³⁰

Farbtemperaturen werden in Kelvin angegeben, wobei 0° Celsius in etwa 273 Kelvin entsprechen. Licht mit einem größeren Rot-Anteil strahlt mit geringerer Farbtemperatur und wird von uns als wärmer empfunden, als Licht mit einem hohen Blau-Anteil, welches auch höhere Farbtemperaturen annimmt, und von uns kälter empfunden wird.³¹

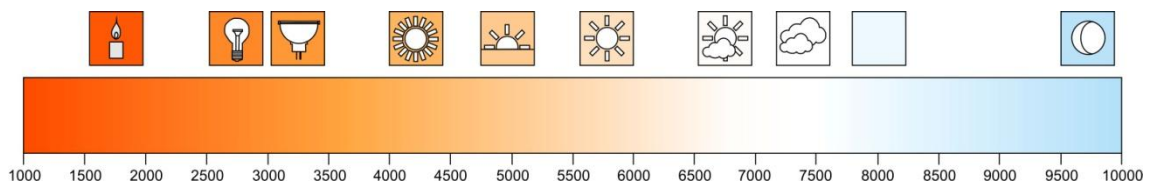


Abbildung 8: Beispiele verschiedener Farbtemperaturen (in Kelvin).³²

LED-Lichtquellen können je nach Bauart, Material und Hersteller in jedem Farbtemperatur-Bereich ihr Licht abgeben. Entscheidend ist hierbei welche LED-Typen in welcher Zusammenstellung in einem Scheinwerfer verbaut sind. Grob eingeteilt werden Sie in "Warmweiß" (bis ca. 3000K), "Neutralweiß" (ca.3000K bis ca. 5000K) und "Tageslichtweiß" (ab ca. 5000K).³³

³⁰ Vgl. Dietze, 2014: S.8

³¹ Vgl. Bewer, Steckmann, 2004: S.35/36

³² http://blog.soda-light.de/wp-content/uploads/2012/04/Farbtemperatur_Skala.jpg

³³ Vgl. <http://www.wirsindheller.de/Farbtemperatur-Kelvin.45.0.html> [Stand: 13.05.2014]

2.3.4 Wirkung von Farben

„Die Erfahrung lehrt uns, daß die einzelnen Farben besondere Gemütsstimmungen geben.“³⁴

- Johann Wolfgang von Goethe -

Farben spielen in unserem modernen Leben in jeder Lebenslage eine Rolle. Im Unterbewusstsein sind Farben Eigenschaften, die unsere Entscheidungen beeinflussen, sich auf unser Wohlbefinden auswirken und Instinkte wecken können. Grundlegend unterscheidet man zwischen der physiologischen und der psychologischen Farbwirkung.³⁵ Farben sind für unseren Körper wie Reize auf die wir messbar mit z.B. Anspannung oder Entspannung reagieren. Zudem wirken Farben auf unsere Psyche indem wir uns wohl oder unwohl fühlen. Außerdem empfindet jeder Farben ganz individuell, je nach persönlichen Erfahrungen und Erlebnissen. Zunächst empfinden wir Farben, bevor die Farbwirkung beginnt.³⁶

Farbe	Farbempfindung	Farbwirkung (mögliche Interpretation)
Rot	Farbe des Feuers	- erregt Aufmerksamkeit - steht für Vitalität und Energie, Liebe und Leidenschaft
Orange	Farbe der untergehenden Sonne	- Symbolfarbe für Optimismus - signalisiert Aufgeschlossenheit - steht für Gesundheit und Selbstvertrauen
Gelb	Farbe der Sonne	- Licht, Heiterkeit, Freude und Wärme - steht für Weisheit und Logik - schmutziges Gelb: Egoismus / Geiz
Grün	Farbe der Wiesen und Wälder	- beruhigende Farbe, Erneuerung des Lebens - Harmonie und Hoffnung / Sicherheit - möglich: Neid/Stagnation
Cyan/Türkis	Farbe des Meeres an einem sonnigen Tag	- Wachheit, Klarheit, Freiheit - sehr kühl, Leere
Blau	Farbe des Himmels	- kalte Farbe, Ruhe Vertrauen, Schönheit - möglich: Melancholie, Nachlässigkeit
Magenta/Pink	Farbe von Blüten	- sanfte Farbe, Idealismus, Dankbarkeit - Arroganz, Dominanz
Violett	Farbe der Inspiration, Mystik, Magie und Kunst	- würdevolle Farbe, außergewöhnlich - Frömmigkeit, Buße - möglich: stolz und unmoralisch
Weiß	Farbe von Eis und Schnee	- Symbol der Reinheit, Klarheit, Erhabenheit und Unschuld - Unnahbarkeit, kühle Reserviertheit

³⁴ http://www.garten-literatur.de/Leselaube/goethe/goethe11_farbe.htm [Stand: 15.05.2014]

³⁵ Vgl. Hammer, 2008: S. 183

³⁶ Ebd.

Schwarz	Farbe der Dunkelheit / Lichtlosigkeit	- Ausdruck von Würde / Ansehen - hat besonders feierlichen Charakter - drückt das Furchterregende und Geheimnisumwitterte aus, Trauer
---------	--	--

Tabelle 2: Empfindung und Wirkung von Farben.³⁷

2.4 Wichtige physikalische Größen

Das Ohmsche Gesetz

Das Zusammenwirken von elektrischer Spannung, elektrischen Strom und elektrischem Widerstand ist die Grundlage der Elektrotechnik und damit auch der Beleuchtungstechnik. Der elektrische Widerstand wird dabei in Ohmen [Ω] angegeben.

$$R = U / I \quad [\Omega = V / A]$$

Formel 1: elektrischer Widerstand (Ohmsches Gesetz).

Die elektrische Leistung P

Die elektrische Leistung gibt an, wie viel Arbeit in einer bestimmten Zeit verrichtet wird.

$$\begin{array}{ll} P = U \times I & [W = V \times A] \\ P = I^2 \times R & [W = A^2 \times V/A] \\ P = U^2 / R & [W = V^2 / V/A] \end{array}$$

Formel 2: elektrische Leistung.

Der Lichtstrom ϕ [phi]

Der Lichtstrom gibt die Strahlungsleistung an, welche von einer Lichtquelle nach allen Seiten abgestrahlt wird. Es ist eine physiologische Größe, da die Strahlungsleistung vom Auge bewertet wird. Der Lichtstrom wird in Lumen [lm] angegeben.³⁸

$$\phi = I \times \Omega \quad [lm = cd \times sr]^{39}$$

Formel 3: Lichtstrom.

³⁷ Burghardt, 2012: S 103

³⁸ Vgl. Mueller, 2008: S101

³⁹ Ebd.

Die Lichtstärke I

Die Lichtstärke gibt an mit welcher Intensität eine Lichtquelle Licht in eine bestimmte Richtung aussendet. Die Lichtstärke verändert sich dabei in Abhängigkeit von der Richtung. Sie wird in Candela [cd] angegeben.⁴⁰

$$I = \Phi / \Omega \quad [\text{cd} = \text{lm} \times \text{sr}]$$

Formel 4: Lichtstärke.⁴¹

(Ω = durchstrahlter Raumwinkel)

Die Leuchtdichte L

Die Leuchtdichte gibt an wie hell unser Auge eine selbstleuchtende oder beleuchtete Fläche empfindet. Sie wird in Candela pro Quadratmeter [cd/m^2] angegeben. Eine Leuchtdichte oberhalb von ca. $0,75 \text{ cd}/\text{m}^2$ empfinden wir als Blendung.⁴²

$$L = I / A$$

Formel 5: Leuchtdichte.⁴³

Die Lichtmenge Q

Die Lichtmenge gibt an wie viel Lichtstrom in Abhängigkeit der Zeit verbraucht wird. Die Lichtmenge wird in Lumensekunden [lms] angegeben.⁴⁴

$$Q = \Phi \times t$$

Formel 6: Lichtmenge.⁴⁵

⁴⁰ Vgl. Mueller, 2008: S.101

⁴¹ Ebd.

⁴² Vgl. Mueller, 2008: S. 103

⁴³ Ebd.

⁴⁴ Vgl. Bewer, Steckmann, 2004: S.37

⁴⁵ Ebd.

Die Beleuchtungsstärke E

Die Beleuchtungsstärke gibt an wie viel Licht auf eine bestimmte Fläche trifft. In diesem Zusammenhang kann diese Größe auch als Lichtstromdichte bezeichnet werden. Die Beleuchtungsstärke wird in Lux [lx] angegeben.⁴⁶

$$E = \phi / A \quad [lx = lm / m^2]$$

*Formel 7: Beleuchtungsstärke.*⁴⁷

Der Farbwiedergabe-Index R_a

Der Farbwiedergabe-Index gibt an wie die Farbwiedergabe einer künstlichen Lichtquelle mit der Farbwiedergabe einer Bezugslichtquelle übereinstimmt. Der Farbwiedergabe-Index ist ein Qualitätsmerkmal von Leuchtmitteln. Als Bezugslichtquelle dienen dabei die Normlichtarten (siehe Tab.1).

Der Maximalwert des Farbwiedergabe-Index beträgt $R_a = 100$. Zur Bestimmung werden 14 Farbtafeln mit den jeweiligen Lichtquellen bestrahlt und die Farbunterschiede bewertet.⁴⁸

Über den Farbwiedergabe-Index können keine verlässlichen Angaben über die Qualität von einzelnen LED-Leuchtmitteln gewonnen werden, da Leuchtdioden monochromatisches Licht aussenden. Scheinwerfer, die mit unterschiedlichen LED-Typen bestückt sind und farblich steuerbar sind, lassen sich jedoch über diese Angabe bewerten wenn eine Messung von der Lichtquelle abgewandt erfolgt.

⁴⁶ Vgl. Brechmann u.a., 2006: S. 371

⁴⁷ Ebd.

⁴⁸ Vgl. Mueller, 2008: S.85

3 Grundlagen der LED-Technologie

Leuchtdioden sind mittlerweile in den verschiedensten Bereichen unseres Alltags zu finden. Von Scheinwerfern unserer Autos, über Leuchtmittel im Wohnbereich finden wir unterschiedliche LED-bestückte Scheinwerfer in künstlerischen Gestaltungsbereichen wie Theatern, Fernsehstudios und Musikbühnen.

Neben den herkömmlichen Kunstlichtquellen haben LEDs einen entscheidenden Vorteil. Der Wirkungsgrad dieser Technologie ist um ein Vielfaches höher als bei der Verwendung konventioneller Leuchtmittel, bei denen die Abgabe von Licht eigentlich nur eine nebensächliche Eigenschaft ist und der Hauptanteil der Energie über ungenutzte und ungewollte Wärme abgegeben wird.

Obwohl die Leuchtdiode nur ein reichliches Viertel-Jahrhundert nach der Glühlampe erfunden wurde, dauerte es weitere 60 Jahre, bis diese Technik Anfang der Sechziger Jahre serienreif und damit für den internationalen Markt nutzbar wurde. Heute können wir, je nach Verwendungszweck aus einer Vielzahl von Leuchtdioden auswählen. Dabei werden die technischen Eigenschaften stetig besser. In einigen Bereichen hat die LED herkömmliche Lichtquellen vollends vom Markt verdrängt. Bei anderen Anwendungen können wir jedoch noch nicht LED-gestützte Lampen nutzen, da die Unterschiede zu konventionellen Leuchtmitteln zu gravierend sind.⁴⁹

Um neben dem Verständnis für die Thematik Licht weitere grundlegende Fakten für die Erörterung dieser Arbeit darzulegen, wird dieses Kapitel der Leuchtdiode gewidmet. Dabei wird auf das technische Prinzip, verschiedene Typen und auf die Entwicklung eingegangen.

⁴⁹ Vgl. Hillig, 2013: S 2

3.1 Funktionsprinzip einer LED

Leuchtdioden sind spezielle Dioden und arbeiten nach demselben Prinzip. Dioden sind elektronische Bauteile, welche aus zwei unterschiedlichen Halbleiter-Elementen aufgebaut sind die bei angelegter Spannung in Wechselwirkung stehen. Dabei wird ein Halbleitermaterial zum Leuchten angeregt. Dieser Vorgang ist das Prinzip der Elektrolumineszenz.⁵⁰

Mittlerweile existieren unterschiedlichste Bauformen von Leuchtdioden (siehe 3.3. Typen von Leuchtdioden). Dabei besitzen jedoch alle Typen 2 unterschiedliche Anschlüsse. Die Anode ist der Kontakt für das positive Spannungspotential. An die Kathode wird das negative Potential der Versorgungsspannung angeschlossen.

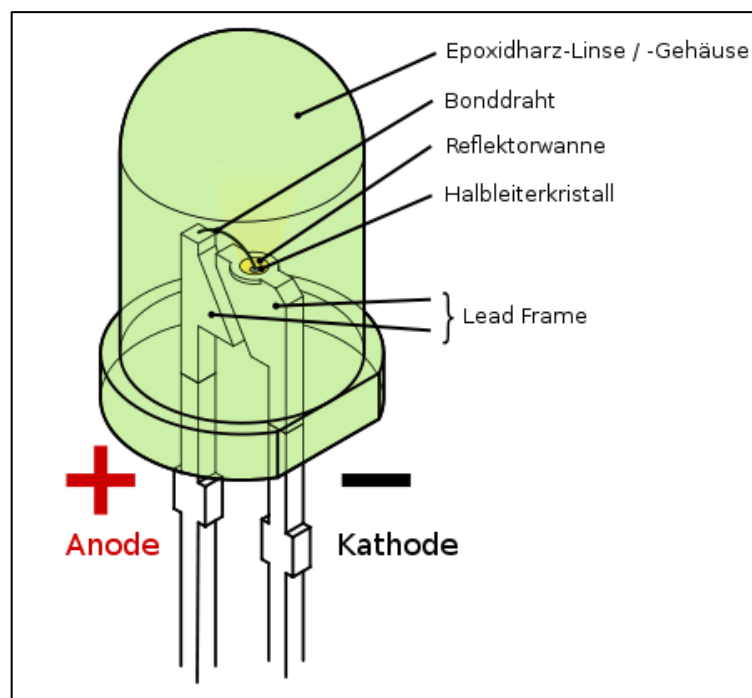


Abbildung 9: Aufbau einer Leuchtdiode.⁵¹

Durch einen sogenannten P-N-Übergang können Elektronen fließen und Energie in Form von Licht freisetzen. Dazu müssen jedoch zuvor die Halbleiter-Materialien wie Gallium oder Silizium verunreinigt werden. Ursprünglich besitzen Halbleiterelemente Atome mit vier Außenelektronen, wodurch sich jedes Atom ideal mit vier weiteren Atomen verbinden kann.

⁵⁰ Vgl. Mueller, 2008: S 150

⁵¹ http://luxando.de/wp-content/uploads/2012/07/450px-LED_5mm_green_de.svg.png

Durch die Verunreinigung mit Elementen wie Arsen (As) oder Bor (B) kommen Atome hinzu, die fünf bzw. nur drei Außenelektronen aufweisen. Kombiniert man nun 2 Halbleiter, die jeweils mit einem anderen Element verunreinigt sind, und legt eine Spannung an, kann ein Strom fließen.⁵²

Die zusätzlichen Elektronen der Atome des n-dotierten Halbleiters, welche auch als Donatoren bezeichnet werden, treffen dann in einer schmalen Sperrschicht auf die sogenannten Löcher, jene fehlenden Außenelektronen der Atome des p-dotierten Halbleiters. Nun lassen sich drei wesentliche Zustände je nach angelegter Spannung definieren.⁵³

keine angelegte Spannung (nicht leitend)	Freie Elektronen treffen in der schmalen Grenzschicht auf Löcher. Das Material ist elektrisch neutral.
Spannung in Sperrrichtung (nicht leitend) = polungsfalsch	Die schmale Grenzschicht wird immer breiter. Es kann kein Strom fließen.
Spannung in Flussrichtung (leitend) = polungsrichtig	Die Elektronen benötigen lediglich eine kleine Spannung um die Grenzschicht zu überwinden. Anschließend fließt ein Strom und die LED leuchtet.

Tabelle 3: Zustände von Leuchtdioden.⁵⁴

3.2 Entwicklungen in der LED-Geschichte

Mittlerweile ist über ein Jahrhundert vergangen, seit 1907 Henry Joseph Round das Prinzip der Leuchtdiode entdeckte. Die Eigenschaft der Lichterzeugung bei bestimmten Halbleiterkristallen wurde allerdings erst über ein halbes Jahrhundert später von Amerika aus für den kommerziellen Markt nutzbar gemacht.⁵⁵

Seitdem entwickeln verschiedenste Hersteller die bestehenden LED-Technologien immer weiter. Während in den Anfangszeiten die Leuchtdiode als reines Anzeigeelement genutzt wurde, löst die Technologie heute bereits große Bereiche von konventionellen Beleuchtungstechniken ab, die der Mensch an künstlich erzeugtem Licht benötigt. Es existieren bereits Leuchtdioden mit einer Lichtausbeute von über 200 lm/W.⁵⁶

⁵² Vgl. http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/led_physik.htm [Stand: 21.05.2014]

⁵³ Vgl. Ebd.

⁵⁴ Vgl. Ebd.

⁵⁵ Vgl. Jahn, 2012: S.5

⁵⁶ Vgl. <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/opto/articles/392504/> [Stand: 21.05.2014]

Die wichtigsten Stationen in der LED-Entwicklung sind:

1907	Henry Joseph Round entdeckt eine Lichtausbeute an Kristallen bei angelegter Spannung. Diese Erkenntnis trat nach der Veröffentlichung vorerst wieder in den Hintergrund.
1921	Der Physiker Oleg Vladimirovich Losev beobachtet das Prinzip der Lichtemission an Halbleiterkristallen weiter und untersucht es bis 1942 genauer.
1935	Der französische Forscher Georges Destriau entdeckt das Prinzip der Elektrolumineszenz bei Experimenten mit Zinksulfid.
1951	Durch die technische Entwicklung des Transistors geht auch die Forschung der Lichterzeugung an Halbleitern weiter. Erste Experimente mit Mischformen von Gallium ergeben gewünschte Ergebnisse.
1962	Der Amerikaner Nick Holonyak bringt die erste rote Leuchtdiode auf den industriellen Markt. Ab diesem Zeitpunkt werden LEDs kommerziell nutzbar.
1971	Die Entwicklung der LED-Technologie schreitet voran. Durch verschiedene Halbleiter-Mischformen können Leuchtdioden in den Farben Grün, Orange und Gelb produziert werden.
1993	Der japanische Physiker Shuji Nakamura entwickelt die erste blaue LED für den kommerziellen Markt. Dabei nutzt er Ergebnisse aus der Forschung mit Galliumnitrid.
1995	Durch Zugabe von bestimmten Leuchtstoffen zu den Halbleitermaterialien können Leuchtdioden produziert werden, die weißes Licht abstrahlen.
2004	Die Firma ETC lässt sich das 7-Farbmischsystem für LED-Scheinwerfer patentieren. ⁵⁷
2006	Die Lichtausbeute von Hochleistungs-Leuchtdioden beträgt bereits über 100 lm/W.
2013	Die Firma CREE produziert eine Leuchtdiode mit einer enormen Lichtausbeute von 276 lm/W. ⁵⁸

Tabelle 4: Stationen der LED-Entwicklung.⁵⁹

⁵⁷ Vgl. Information der Firma ETC zum 7-Farbmischsystem, S.6

⁵⁸ Vgl. Pressemitteilung Firma CREE, 13.02.2013

⁵⁹ Vgl. <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/die-lichtquelle-led/geschichte-der-led/> [Stand: 31.05.14]

3.3 Typen von Leuchtdioden

Verschiedene Anforderungen erfordern mittlerweile sehr unterschiedliche Bauformen von Leuchtdioden. Je nach Einsatzgebiet variiert die Technologie hinter dem jeweiligen Dioden-Typ. Die ersten LED-Typen, die auf den industriellen Markt ihren Einsatz fanden, nutzen wir auch heute noch. Diese sogenannten T-Typ-Dioden verwenden wir hauptsächlich als Anzeige-LEDs. Die Bauform erlaubt nur einen engen Abstrahlwinkel des Lichtes. Die Wärmeabgabe kann über die Fläche der Anschlüsse nur begrenzt erfolgen. Zudem ist das Linsengehäuse gekapselt und verschlechtert dadurch die Wärmeabfuhr (siehe Abb.9).⁶⁰

Ein heute weit verbreiteter Typ ist die SMD-Leuchtdiode (Surface Mount Device-Leuchtdiode). Diese LEDs sind in besonders kleinen Bauformen von nur wenigen Millimetern erhältlich und benötigen keine Bohrungen um auf elektronische Leiterplatten gelötet zu werden. Oft sind verschieden farbige sehr kleine Leuchtdioden zusammengefasst in einem Chip mit mehreren Anschlüssen vergossen.⁶¹ Aufgrund der sehr billigen Herstellung können diese Typen auch als sogenannte Meterware geordnet werden. So lassen sich flexible Bereiche, Kanten und jegliche Flächen mit LED-Beleuchtung bestücken, was zum Beispiel in der Theaterbeleuchtung oft genutzt wird.

Eine weitere Art von Leuchtdiode ist die Superflux-LED. Die große Bauform gewährleistet eine gute Wärmeabstrahlung. Die Weiterentwicklung des T-Typs ermöglicht über vier Anschlüsse die getrennte Ansteuerung von den verbauten RGB-bzw. RGBW-Leuchtdioden. Eine hohe Lebensdauer und ein gutes Abstrahlverhalten machen diesen Dioden-Typ zu einem zuverlässigen Leuchtmittel.⁶²

Eine enorme Leistungssteigerung wurde mit der Einführung der COB-Leuchtdiode (Chip on Board-Leuchtdiode) erreicht. Die Wärmeableitung erfolgt bei dieser Bauform über ein weiterentwickeltes Prinzip. Der LED-Chip ist mit einem Träger verbunden, der über eine Fläche mit der Leiterplatte oder einem Kühlkörper verbunden werden kann (siehe Abb.10). Die robuste Bauform ermöglicht höhere Ströme und damit eine höhere Lichtausbeute. Außerdem lassen sich diese LED-Typen zu LED-Feldern, den sogenannten LED-Arrays zusammenfassen. Dadurch kann die Lichtausbeute nochmals gesteigert werden wobei die Arrays farblich kombiniert werden können. Die Technologie wird bereits erfolgreich im Veranstaltungs-, Theater- und Fernsehbereich eingesetzt.⁶³

⁶⁰ Vgl. http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/led_typen.htm [Stand: 04.05.2014]

⁶¹ Vgl. Ebd.

⁶² Vgl. Dietze, 2014: S.30

⁶³ Vgl. Ebd.

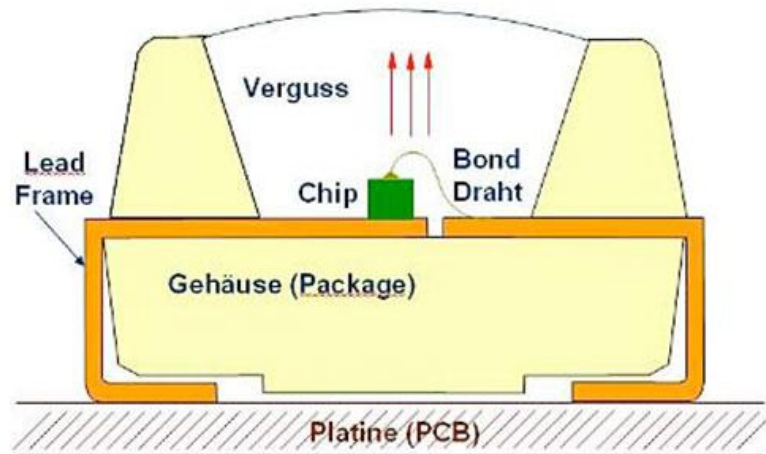


Abbildung 10: Aufbau einer COB-LED.⁶⁴

3.4 Farbwiedergabe von Leuchtdioden

Die Farbwiedergabe von Leuchtdioden lässt sich nur schwer mit der Farbwiedergabe von konventionellen Leuchtmitteln vergleichen, da eine einzelne Leuchtdiode nur einen sehr schmalen Wellenlängenbereich des gesamten Lichtspektrums aussenden kann. Deshalb ist die Leuchtdiode einzeln betrachtet ein sogenannter monochromer Strahler.⁶⁵

Um ein breites Farbspektrum nachbilden zu können, muss auch ein breites Spektrum an Leuchtdioden eingesetzt werden. In heutigen LED-Scheinwerfern sind unterschiedlich-farbige Leuchtdioden verbaut. Über eine Steuerung können dann die einzelnen gewünschten Farbanteile des Farbspektrums über die LEDs angesteuert werden und man erhält das gewünschte Farbergebnis. Allerdings gibt es unzählige Hersteller von Leuchtdioden und ebenso viele Möglichkeiten die Leuchtmittel in Scheinwerfern anzuordnen und farblich zu kombinieren. Hinzu kommen die Abweichungen bei der Produktion der Leuchtmittel. Halbleitermaterialien variieren teils erheblich in ihrer Zusammensetzung. Dadurch kommt es zu Toleranzen bei der Farbwiedergabe, dem Wirkungsgrad und anderen Parametern. Diese Abweichungen erfordern eine Einteilung der Einzelnen Produktionsreihen, welche über das sogenannte Binning erfolgt.⁶⁶

LEDs einer Produktionsreihe, auch Bin genannt, können so gekennzeichnet auch in einem Scheinwerfer verbaut werden. Dadurch kann die Qualität des LED-Lichts verbessert und etwas standardisiert werden.

⁶⁴ <http://www.techuni.de/wp-content/uploads/2012/12/COB-LED-Technik-Skizze.jpg>

⁶⁵ Vgl. Mueller, 2008: S.152

⁶⁶ Vgl. Mueller, 2008: S.153

Scheinwerfer mit verschiedenen farbigen Leuchtdioden und einem Farbmischsystem können auch verschiedene Bereiche des Farbspektrums abbilden und lassen sich daher auch über bestimmte Parameter mit der Farbwiedergabe von konventionellen Leuchtmitteln vergleichen.

Die Farbe der Leuchtdiode wird durch die Wahl des Halbleitermaterials und dessen Anreicherung mit verschiedenen Elementen realisiert. Das oft verwendete Material Gallium wird mit Phosphiden oder Arseniden versetzt und kann je nach Kombination der Elemente verschiedenen Mengen an Energie in Form von Licht abgeben.⁶⁷

Durch diese Herstellungsmethode lassen sich LEDs in allen Farben produzieren mit Ausnahme der Farbe Weiß. Diese besondere Lichtfarbe, welche Farbanteile des gesamten Spektrums enthält, kann eine sogenannte Lumineszenz-Diode erzeugen. Hier wird das Material einer blauen LED mit einer Phosphatschicht angereichert, die je nach Intensität den Weißanteil beeinflusst.⁶⁸

Weitere Parameter wie die Ansteuerelektronik, verwendete Software, Alterungsprozesse der Materialien und Umgebungsfaktoren beeinflussen die Farbwiedergabe der LEDs teils erheblich.⁶⁹

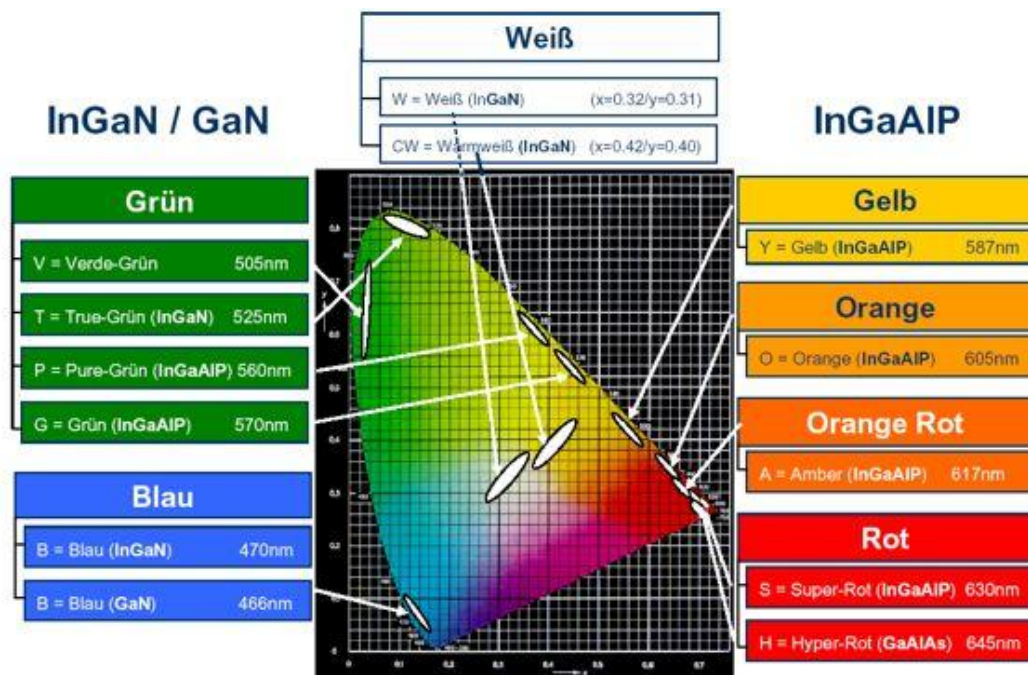


Abbildung 11: LED-Farben im CIE-Farbraum.⁷⁰

⁶⁷ Vgl. http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lichtfarben/index.jsp [Stand:04.05.2014]

⁶⁸ Vgl. Ebd.

⁶⁹ Vgl. http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/led_physik.htm [Stand:04.05.2014]

⁷⁰ <http://www.hbernstaedt.de/knowhow/led/farbspektrum.jpg>

4 Stand / Notwendigkeit

Die technischen Möglichkeiten entwickeln sich rasant. Die Effizienz von LED-Lichtquellen wird stetig verbessert und löst in fast allen Bereichen konventionelle Beleuchtungstechniken ab. Alle Leuchtmittel-Hersteller haben große Teile ihrer Produktion und Entwicklung dem LED-Markt gewidmet. Leuchtdioden sind das Ergebnis einer nachhaltigen Technologie. Eine sehr lange Lebensdauer, geringer Energieverbrauch und eine hohe Lichtausbeute machen Leuchtdioden zu einer sehr effizienten Lichtquelle unserer Zukunft. Die teilweise noch hohen Anschaffungskosten, rechnen sich über die Energieersparnis im Vergleich zu herkömmlichen Lampen.

Allerdings gibt es auch Anwendungsbereiche, in denen die LED-Technologie noch nicht ausgereift genug ist, um bestehende erfolgreiche Technologien vom Markt zu verdrängen. Das kann viele Ursachen haben. Für bestimmte Anwendungen reicht die Lichtleistung von LEDs einfach noch nicht aus. Zudem sind die Anschaffungskosten von Hochleistungs-Leuchtdioden noch sehr hoch. Außerdem gibt es teils erhebliche Defizite bei der Standardisierung von LED-Lichtquellen, da Toleranzen bei der Produktion auftreten. Die Farbwiedergabe ist ein weiterer Parameter, der den Anwender noch zögern lässt, auf LED-Scheinwerfer umzurüsten.

Vor allem die Beleuchtungstechnik kultureller Betriebe kann dadurch nur zögernd durch innovative LED-Technologie abgelöst werden. Für Film- und Theater-Produktionen sind ebenso wie in Fernsehstudios und bei Veranstaltungen jeglicher Art leistungsstarke Kunstlichtquellen, die über eine authentische Farbwiedergabe verfügen erforderlich.

Es gibt neben der klassischen RGB-Farbsteuerung bereits genügend erweiterte Technologien, um zu versuchen mit Leuchtdioden authentisch Farben wieder zu geben. Erweitert mit der Einführung der weißen LED existiert das RGBW-Mischsystem. Zudem wurden anders farbige Leuchtdioden, wie die Amber-farbige LED hinzugemischt und ermöglichten das RGBWA-Mischsystem. Alle Farbmischsysteme weisen jedoch Einbußen im Farbspektrum auf. Komplexe Steuerungen verhindern zudem stufenlose Übergänge zwischen einzelnen Farben.

Ein neuartiges Farbmischsystem soll eine authentische Farbwiedergabe, ohne fehlende Spektralanteile und lückenlose Farbfades realisieren. Die Firma ETC patentierte dazu das sogenannte 7-Farbmischsystem. Aufgrund der Defizite bisheriger Farbmischsysteme lässt sich über die Notwendigkeit nicht zweifeln. Wie das System im Vergleich mit konventionellen ETC-Leuchtmitteln arbeitet, sollen die nächsten Kapitel dieser Arbeit analysieren.

5 Untersuchung des 7-Farbmischsystems

Die Experimente mit Leuchtdioden und deren Anordnung in Scheinwerfergehäusen dauern bereits einige Jahre an. Viele Prototypen wurden entwickelt und zeigten im aufwendigen Betrieb des Alltags vor allem auf kulturellen Bühnen, dass die Systeme nicht ausreichend durchdacht sind und erhebliche Qualitätseinbußen im Farbverhalten aufweisen. Finanzielle Beweggründe und zunehmende Debatten über die Nachhaltigkeit von künstlichen Lichtquellen treiben die rasanten Entwicklungen der LED-Industrie jedoch weiter voran. An jedem Parameter der Leuchtdiode wird geforscht. Alle Bemühungen sollen letztendlich zu dem Ziel führen, die konventionelle Lichttechnik zu ersetzen, beziehungsweise deren erhebliche Nachteile wie hohen Verschleiß und eine sehr geringe Effizienz zu minimieren.

Viele Kunden der Beleuchtungsindustrie nutzen bereits erfolgreich LED-Anwendungen. Allerdings ist eine Umrüstung in großen Bereichen nicht so einfach möglich. Ein erheblicher finanzieller Aufwand rechtfertigt oftmals keine Umrüstung mit einem hohen Risikopotential. Zudem ist leistungsstarke Lichttechnik ab bestimmten Klassen einfach nicht LED-fähig. Neben den Entwicklungen am Leistungsverhalten von Leuchtdioden, wird am Farbverhalten geforscht. Das innovative x7-Farbmischsystem der Firma ETC ist ein Ergebnis in diesem Bereich.

In den folgenden Kapiteln wird diese Technologie analysiert und mit herkömmlicher Lichttechnik verglichen. Dazu wird das neue Farbsystem vorgestellt und die Technik dahinter beleuchtet. Mithilfe des Spektralanalyse-Verfahrens werden die Farben analysiert und verglichen. Die Ergebnisse werden anschließend grafisch dargestellt und diskutiert.

5.1 Die Vergleichsmethode

Um eine neuartige Technologie zu untersuchen ist es sinnvoll, diese unter bestimmten Parametern mit bereits bestehender Technik zu vergleichen. Jeder Scheinwerfer ist die Weiterentwicklung von Beleuchtungstechnik, die bereits auf dem Markt existiert, aber in den Augen von Herstellern und Anwendern noch Potential zur Verbesserung besitzt. Nun gibt es bei der Vielzahl an Produkten auf dem Markt der Beleuchtungstechnik sehr viele Möglichkeiten verschiedenste Scheinwerfer miteinander zu vergleichen. Somit muss für ein aussagekräftiges Ergebnis erst einmal die richtige Auswahl der zu vergleichenden Objekte getroffen werden.

Bei der vorliegenden Arbeit wurde die Entscheidung getroffen Produkte eines Herstellers zu vergleichen. Das Unternehmen ETC bietet LED-Scheinwerfer an, welche das zu untersuchende neue 7-Farbmischsystem realisieren können und herkömmliche Scheinwerfer mit Halogen-Leuchtmitteln, die bereits lange Zeit zuverlässige Beleuchtungsarbeit leisten.

Nach der Auswahl der Beleuchtungstechnik musste die Auswahl der zu vergleichenden Parameter getroffen werden. Aufgrund der neuartigen Farb-Technologie, soll der Fokus der Betrachtung auch auf dem Farbverhalten und der Analyse einzelner Farben liegen. Um dieses Verhalten wissenschaftlich und technisch einwandfrei zu untersuchen, bietet sich nur das Messverfahren der Spektralanalyse an (siehe 5.4. Das Messverfahren).

Das verwendete Messinstrument bietet neben der kompletten Analyse des Spektralganges in Bild- und Datenform weitere wertvolle Parameter an, die Auskunft über die Qualität des Lichtes geben. Verglichen werden demnach auch Angaben zur Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur, und der Wert des Farbwiedergabeindex. Zudem kann der genaue Farbart in den CIE-Normfarbtafeln 1931 und 1976 verglichen werden.

Angaben zu technischen Parametern und dem Preis sollen gesondert betrachtet werden.

Für diesen Vergleich wurde außerdem ein Raum geschaffen, der es ermöglicht die zu vergleichenden Objekte unter möglichst identischen Bedingungen zu testen um Messabweichungen und Störungen zu minimieren (siehe 5.3. Der Versuchsaufbau).

5.2 Der Versuchsaufbau

Für den Versuch der dieser Arbeit zugrunde liegt, konnte eine Probephase des Theaters am Schiffbauerdamm in Berlin genutzt werden. Durch die Möglichkeit den Raum komplett zu verdunkeln, konnten die notwendigen Bedingungen für den Vergleich hergestellt werden. Die Bühne war mit einer Dimmeranlage ausgestattet, die ebenfalls benutzt werden konnte. Eine Leinwand (2 x 4 Meter) diente als weißer Fläche für eine saubere Abbildung der Lichtfarben.

Für den Vergleich von x7-LED-Scheinwerfern mit einem Halogen-Scheinwerfer wurde folgende Technik genutzt:

- 1x ETC-PAR D40 (VIVID-LED-Bestückung)
- 1x ETC-PAR D40 (LUSTRA-LED-Bestückung)
- 1x ETC-PAR Source Four (Halogen)
- 1x ETC-Pult smartfade 1248
- 1x UPRtek LED-Meter inkl. SD-Karte
- 1x Laptop
- Hardware (Stative, Klammern, Farbrahmen etc.)
- Verkabelung: DMX-Kabel, Schuko-Kabel...
- Dimmeranlage des Theaters

5.2.1 Der Versuchsablauf

Die drei Scheinwerfer wurden jeweils auf einem Stativ in einem Abstand von zwei Metern vor der weißen Referenzfläche aufgebaut und mit dem Pult dahinter verbunden. Gemessen wurde mit dem LED-Meter in einem Abstand von ca. einem Meter zur Lichtquelle hin.

Zunächst wurden die einzelnen LED-Typen und die Halogen-Lichtquelle spektral analysiert. Anschließend wurde der Farbvergleich durchgeführt. Dazu wurden 10 Farbfilter, welche im täglichen Theaterbetrieb ihren Einsatz finden, verwendet. Zuerst wurde immer der Halogen-Scheinwerfer mit Farbfolie gemessen. Danach wurde versucht, die Farbe über das Lichtpult an den beiden LED-Scheinwerfern nachzubilden. Hierzu ist es möglich jede einzelne LED-Farbe über einen separaten Fader zu regeln. So können die Farben getrennt angesteuert werden und zu unterschiedlichen Intensitäten zusammen gemischt werden. Anschließend wurden die Spektralgänge der Scheinwerfer mit dem 7-Farbmischsystem aufgenommen und gespeichert.

Nach drei vergleichenden Messungen einer Farbe wurde das LED-Spektrometer neu kalibriert um Messabweichungen zu vermeiden.



Abbildung 12: Versuchsaufbau der Vergleichsmethode.⁷¹

Nachdem die Messungen der einzelnen Farben beendet waren, wurde ein spezieller Vergleich zwischen Weißtönen durchgeführt. Hierbei wurden ein kühler Weißton, welcher dem Tageslicht entspricht und ein wärmerer Weißton, welcher dem Licht einer Glühlampe entsprechen soll, nachgebildet und verglichen.

⁷¹ Foto: Georg Meyer

Beide Farbtöne sind in der Beleuchtungstechnik unerlässlich, da sie das Licht natürlicher Quellen wie Sonne und Feuer wiedergeben. Lichtquellen, die Tageslicht ersetzen sollen, bestehen normalerweise überwiegend aus HMI-Leuchtmitteln und Lichtquellen die dem Licht einer Kerze nachempfunden sind, bestehen aus Glühlampen.

Nach Aufnahme dieser Farbspektren wurde das Dimmverhalten beider Lampenarten untersucht. Hierzu wurde die Intensität der Lichtquellen in zehn-Prozent-Schritten von 100 Prozent bis auf null Prozent gedimmt und jeweils eine Messung mit dem Spektrometer durchgeführt. Jede Art von Lichttechnik besitzt ein eigenes charakteristisches Verhalten bei unterschiedlichen Intensitäten. Oft gibt es Probleme beim dimmen von Leuchtdioden. Für die Analyse der Qualität einer Lichtquelle ist das Dimmverhalten daher ein wichtiger Parameter.

5.3 Das Messverfahren

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Qualität einer Lichtquelle zu untersuchen. Viele Messverfahren sind allerdings darauf ausgerichtet Messungen an künstlichen Lichtquellen durchzuführen, die Licht mit Farbanteilen vom gesamten Lichtspektrum gleichzeitig aussenden. Hier finden Beleuchtungsstärke- oder Farbtemperaturmessgeräte ihren Einsatz. Die Sensorik dieser Instrumente ist allerdings nicht für Messungen an monochromatischen Lichtquellen ausgelegt und führt daher bei der Anwendung mit LED-Leuchtmitteln zu Fehlern und Messabweichungen. Für Farbmessungen an und mit Leuchtdioden ist ein Farbspektrometer erforderlich. Mit einem solchen Messgerät können einzelne Wellenlängenbereiche des breiten Farbspektrums genauso wie das gesamte Farbspektrum untersucht werden.⁷² Der Messung mit dieser Art Messgerät liegt das Spektralverfahren nach DIN 5033 zu Grunde.⁷³

Das Messinstrument nimmt das Spektrum der Lichtquelle auf. Über die gewonnene Strahlungsfunktion lassen sich durch Integration von $\lambda=380\text{nm}$ bis $\lambda=780\text{nm}$ die Normfarbwerte berechnen.

⁷² Vgl. Mueller, 2008: S.152

⁷³ Vgl. http://www.bs-ballasts.com/Workshop/N_Unzner/PDF/Lichtanalyse.pdf: S.4 [Stand:30.05.2014]

$$\begin{aligned}
 X &= a \int_k^l \Phi_{\lambda} \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 Y &= a \int_k^l \Phi_{\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 Z &= a \int_k^l \Phi_{\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned}$$

Formel 8: Berechnung der Normfarbwerte X, Y, Z .⁷⁴

Die über die Gleichung (siehe Formel 8) normierten Normfarbwerte können dann zur Berechnung der bekannten Normfarbwertanteile x und y genutzt werden.

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\
 y &= \frac{Y}{X + Y + Z}
 \end{aligned}$$

Formel 9: Berechnung der Normfarbwertanteile x und y .⁷⁵

Die Koordinaten für die CIE-UCS-Normfarbtafel werden lediglich aus den x -/ y -Werten transformiert.

$$\begin{aligned}
 u' &= \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\
 v' &= \frac{9y}{-2x + 12y + 3}
 \end{aligned}$$

Formel 10: Berechnung des Farbortes in der CIE UCS 1976 Farbtafel.⁷⁶

Neuartige Messgeräte verarbeiten den aufgenommenen Spektralgang zu einer Grafik und zeigen die Farbverteilung im sichtbaren Spektrum grafisch an. Zudem werden die Koordinaten der Normfarbtafeln berechnet und ebenfalls angezeigt. Ein solches Messgerät wurde auch für den Vergleich der 7-Farbmischung des ETC-LED-Scheinwerfers mit einem ETC-Halogen-Scheinwerfer genutzt.

Das LED-Meter der Firma UPRtek misst mit einem hochsensiblen Sensor den Spektralgang der Lichtquelle per Knopfdruck. Die Messung erfolgt dabei mit einem bestimmten Abstand zur Lichtquelle direkt in Richtung der Lichtquelle, nicht wie bei anderen möglichen Messungen zu einem Objekt hin gerichtet.

⁷⁴ Vgl. http://www.bs-ballasts.com/Workshop/N_Unzner/PDF/Lichtanalyse.pdf: S.7 [Stand:30.05.2014]

⁷⁵ Vgl. http://www.bs-ballasts.com/Workshop/N_Unzner/PDF/Lichtanalyse.pdf: S.8 [Stand:30.05.2014]

⁷⁶ Vgl. Ebd.



Abbildung 13: LED-Spektrometer der Firma UPRtek.⁷⁷

Per Touch Screen kann zwischen vier verschiedenen Anzeige-Fenstern ausgewählt werden. Das LED-Meter zeigt den kompletten Spektralverlauf, den Farbart mit x-/y-Koordinaten in der CIE-1931-Normfarbtafel, den Farbart mit u'-v'-Koordinaten in der CIE-1976-Normfarbtafel und ein viertes Fenster mit weiteren Messergebnissen an.

Die Messwerte bestehen aus einer Angabe der Farbtemperatur, des Farbwiedergabeindex, der Beleuchtungsstärke und der Wellenlänge im Farbspektrum bei der die Lichtintensität der gemessenen Lichtquelle maximal strahlte.⁷⁸

Diese Ergebnisse können kompakt als JPEG-Datei und nummerisch zur Weiterverarbeitung in Excel in passendem Format abgespeichert werden.

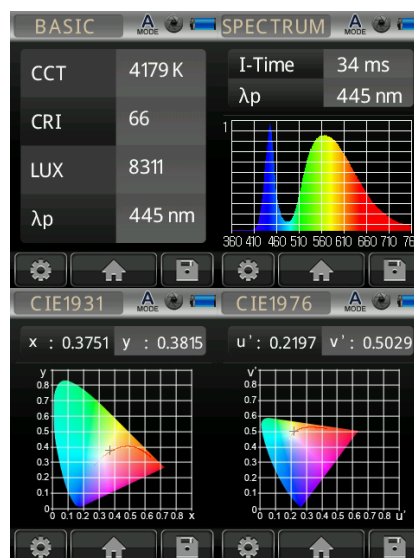


Abbildung 14: Messergebnisse des LED-Meters kompakt als Bild-Datei.⁷⁹

⁷⁷ Foto: Georg Meyer

⁷⁸ Vgl. <http://www.uprtek.com/DB/uploads/PDF/user%20manual-MK350-en.pdf> [Stand:02.06.2014]

⁷⁹ Grafik: Danny Hillig

5.4 Das x7-Farbmischsystem von ETC

Seit dem Einsatz der Leuchtdiode als Kunstlichtquelle für uns Menschen, versuchen wir die Leuchtcharakteristik von konventionellen Leuchtmitteln wie Glühlampen oder Halogenstrahlern zu ersetzen. Durch die enorme Effizienzsteigerung und die nachhaltigere Technologie hat die LED ein enormes Wachstumspotential.

Während bisher verschiedenste Farbfilter vor den Lichtquellen eingesetzt wurden um den gewünschten Farbeffekt zu bewirken, strahlen Leuchtdioden, je nach Bauart Licht mit einer eng begrenzten Wellenlänge und damit Lichtfarbe ab.

Um mit einem LED-Scheinwerfer verschiedene Farben zu erzeugen, muss dieser mit Leuchtdioden bestückt sein, die verschiedene Lichtfarben erzeugen können, also mit verschiedenen LEDs. Der Scheinwerfer besteht also aus vielen kleinen verschiedenen Lichtquellen, die in einer bestimmten Anordnung versehen mit einem Linsensystem eine einzelne Lichtquelle darstellen sollen. Durch eine Steuerung, die im Regelfall über das DMX-Protokoll realisiert wird, werden die LEDs einzeln geregelt und können über additive Farbmischung prinzipiell jede Farbe realisieren. Bisher geschah das über das herkömmliche RGB-Farbmischsystem. Erweiterungen wie RGBW- oder RGBWA-Farbsteuerungen erbrachten ähnliche Ergebnisse bei der Farbwiedergabe.

Die Firma ETC patentierte bereits 2004 ein neuartiges Farbmischsystem, mit dem eine wesentlich genauere Farbwiedergabe realisiert werden soll, da bei den konventionellen Mischsystemen teils erhebliche Intensitätseinbußen in bestimmten Wellenlängenbereichen des Lichtspektrums nachgewiesen wurden (dazu siehe Anhang D).

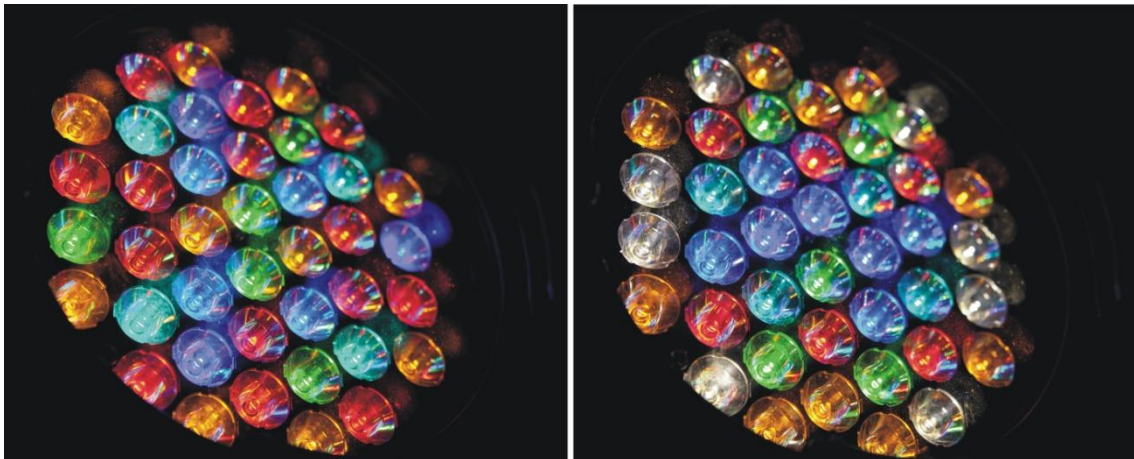


Abbildung 15: ETC-Selador-LED-Bestückung (links: VIVID, rechts: LUSTR+).⁸⁰

⁸⁰ Fotos: Georg Meyer

Mit der Selador-Scheinwerfer-Serie brachte der Lichttechnik-Hersteller nun erstmals LED-Beleuchtung auf den Markt, die mit 7 verschiedenen farbigen Leuchtdioden bestückt sind. Hinter dieser Technologie steckt eine einfache Überlegung: „Sehr einfach ausgedrückt ist x7 die Verkörperung der Philosophie, dass mehr Farbe in einem Light Engine zu einer besseren Lichtausgabe führt. In jedem Selador-Gerät sind sieben verschiedene LED-Farben optimal angeordnet, um leuchtende, kräftige Farben und weiches, reines Licht zu erzeugen.“⁸¹

Zudem werden verschieden bestückte Scheinwerfer angeboten. So kann je nach Anwendungswunsch die LED-Farbauswahl angepasst werden um optimale Ergebnisse zu erzeugen. Für den Vergleich dieser Arbeit wurden ETC-Scheinwerfer mit der x7-Farbestückung VIVID und LUSTR+ verwendet.

5.4.1 Die LED-Technik der Selador-Serie

Die ETC-D40-Scheinwerfer der Selador-Serie arbeiten mit jeweils 40 Leuchtdioden die in unterschiedlichen Kombinationen in einem Gehäuse hinter einer transparenten Schutzschicht verbaut sind. Dabei sind die Leuchtdioden vom Typ Luxeon® Rebel™ LED Emitter der Firma Phillips. Der Abstrahlwinkel dieser LEDs beträgt laut Hersteller 17°. ⁸²

ETC bietet für verschiedene Anwendungsgebiete verschieden bestückte LED-Scheinwerfer an. Im Einzelnen wurden für die Selador-Typen VIVID und LUSTR+ folgende LED-Bestückungen ausgewählt:

ETC-VIVID	ETC-LUSTR+
<ul style="list-style-type: none"> - 3 indigo LEDs - 4 blaue LEDs - 4 cyan LEDs - 5 grüne LEDs - 10 amber LEDs - 7 rot-orange LEDs - 7 rote LEDs 	<ul style="list-style-type: none"> - 8 weiße LEDs - 3 indigo LEDs - 4 blaue LEDs - 4 cyan LEDs - 5 grüne LEDs - 10 amber LEDs - 6 rote LEDs

Tabelle 5: LED-Bestückung der ETC-Selador-Typen VIVID und LUSTR+.

⁸¹ ETC

⁸² Vgl. ETC-Bedienungsanleitung, 2012: S.10

Der entscheidende Unterschied dieser beiden ETC-Typen ist die Bestückung mit weißen Leuchtdioden. Während bei dem VIVID-Typ komplett auf weiße LEDs verzichtet wurde, ersetzte man bei dem LUSTR+-Typ die rot-orangen Leuchtdioden durch kaltweiße Leuchtdioden. Wie bei der Auswertung zu erkennen ist, gibt es erhebliche Unterschiede beim Farbverhalten, wenn weiße LEDs direkt zur Farbmischung beitragen oder Weiß durch additive Farbmischung entsteht.

Der Hersteller ETC wirbt mit speziellen Anwendungen und Charakterisierung der einzelnen Farbtypen. So verspricht er mit dem LED-Scheinwerfer der VIVID-Bestückung vorwiegend satte Farben realisieren zu können. Die intensitätsstarken Farbverläufe sollen diesen Scheinwerfer für den Einsatz auf jeglicher Art von Event optimieren.⁸³

Der LED-Scheinwerfer mit der LUSTR+-Bestückung sei ein idealer Scheinwerfer für den Theaterbetrieb, da Farbverläufe ebenso wie zuverlässige Weißtöne realisiert werden können. Mit dieser Farbausstattung ist dieser Typ als sogenanntes Washlight in allen Bereichen der Theaterbühnen einsetzbar.⁸⁴

Folglich sollen die einzelnen Leuchtdioden hinsichtlich ihres Farbspektrums dargestellt werden. Hierzu wurde das Spektrum jeder einzelnen LED-Farbe mit dem LED-Meter aufgenommen. Die entstandenen Intensitäten der unterschiedlichen Wellenlängenbereiche sehen wie folgt aus:

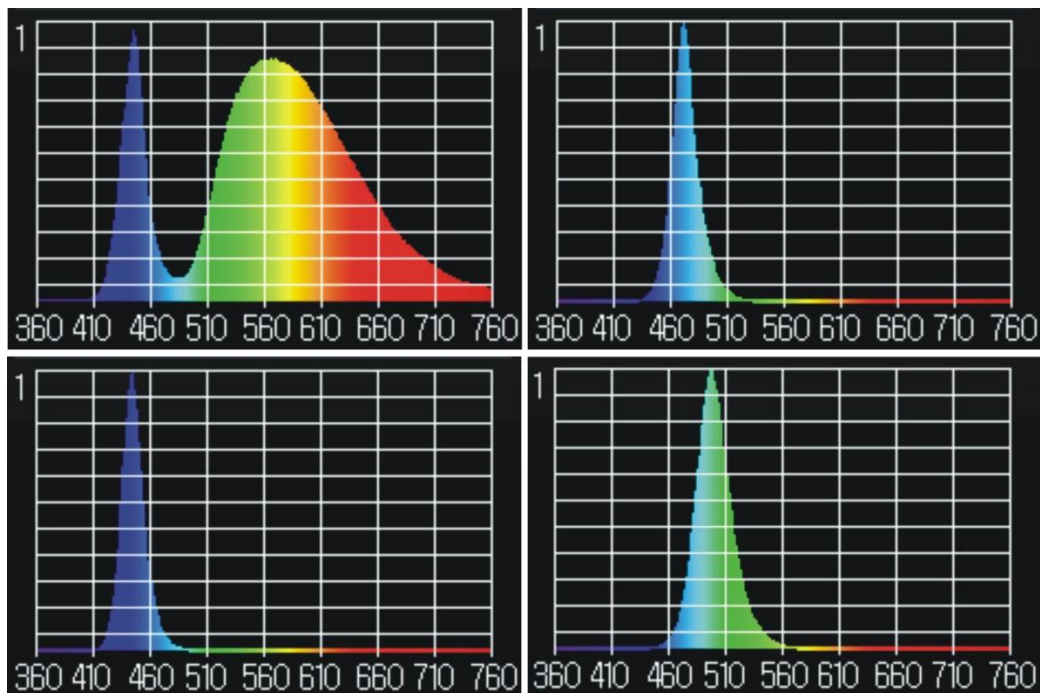


Abbildung 16: LED-Spektren der Selador-Serie (links: weiß, indigo; rechts: blau, cyan).⁸⁵

⁸³ Vgl. ETC-Bedienungsanleitung, 2012: S.11

⁸⁴ Vgl. Ebd.

⁸⁵ Grafik: Danny Hillig

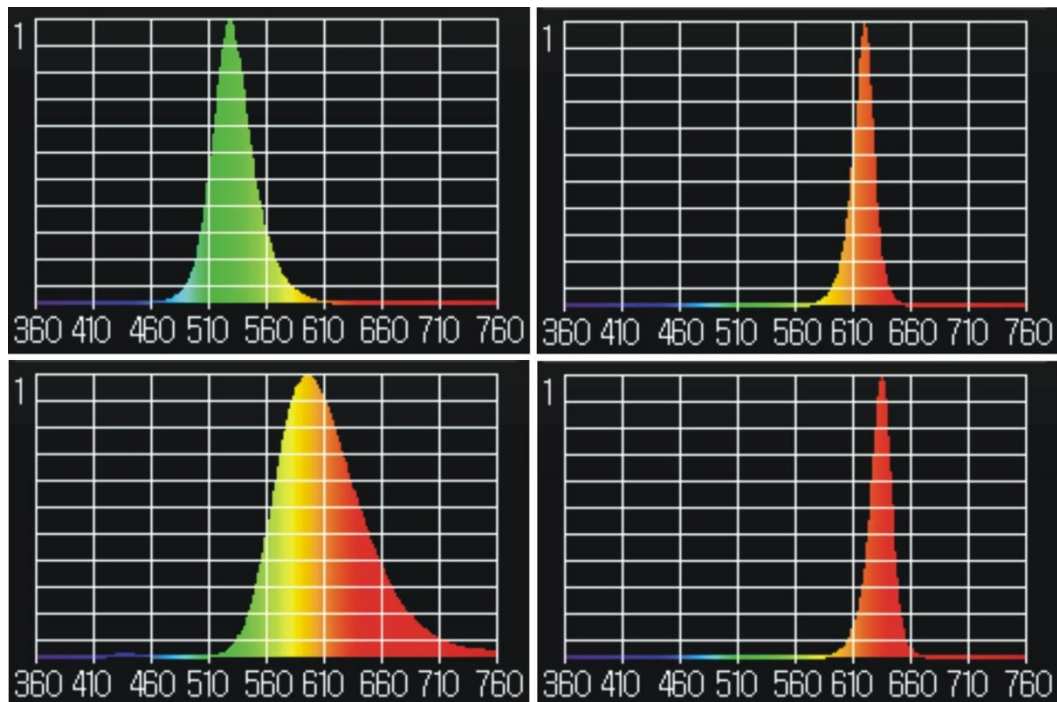


Abbildung 17: LED-Spektren der Selador-Serie (links: grün, amber; rechts: rot-orange, rot).⁸⁶

Die schmalbandigen Intensitätskurven der Leuchtdioden zeigen die monochrome Eigenschaft der Leuchtdiode. Allerdings sind Tendenzen erkennbar, welche zeigen, dass eine LED auch ein breiteres Farbspektrum abbilden kann. So sind die Flanken der amber-farbiges LED wesentlich flacher. Sehr deutlich ist auch bei der weißen LED die Beeinflussung des abgegebenen Farbspektrums durch die aufgetragene Phosphorschicht zu erkennen. Es ist deutlich zu sehen, dass der Peakbereich bei ca. 440 nm identisch dem der blauen LED ist. Hinzu kommt ein weiterer breiter Wellenlängenbereich mit einem Maximum bei 565 nm und der Wiedergabe von großen Anteilen grün, gelb und rot, wodurch ein sehr authentisches Weiß abgegeben werden kann.

Da sich die gleichen LED-Typen der zwei verschiedenen Scheinwerfer nahezu identisch verhalten, wurde in diesem Fall auf eine doppelte Darstellung verzichtet. Allerdings wurden die einzelnen LED-Typen der Scheinwerfer gesondert ausgemessen. Im Anhang (siehe Anhang A) können die Spektralgänge pro Scheinwerfer noch einmal nachvollzogen werden. Geringe Abweichungen sind auf Messtoleranzen zurück zu führen. Zudem lässt sich an diesen Abweichungen das beschriebene Binning (siehe Kapitel 3.4. Farbwiedergabe von Leuchtdioden) nachvollziehen.

⁸⁶ Grafik: Danny Hillig

Neben den einzelnen Spektren wurden weitere Messergebnisse aufgenommen, welche in der folgenden Tabelle dargestellt sind:

VIVID	weiß	indigo	blau	cyan	grün	amber	rot-orange	rot
Max.(nm)	/	443	474	498	529	596	620	637
LUX	/	418	1398	3873	4617	12779	6646	5802
x	/	0.1592	0.1172	0.0784	0.2251	0.5614	0.6689	0.6964
y	/	0.0196	0.1101	0.5000	0.7049	0.4254	0.3269	0.2982
u'	/	0.2183	0.1147	0.0355	0.0818	0.3217	0.4791	0.5372
v'	/	0.0604	0.2425	0.5089	0.5763	0.5483	0.5268	0.5176
LUSTR+								
Max.(nm)	445	443	471	498	528	595	/	634
LUX	8311	336	904	1698	4477	7481	/	3906
x	0.3751	0.1519	0.1223	0.0805	0.2157	0.5616	/	0.6948
y	0.3815	0.0194	0.0905	0.4546	0.7073	0.4267	/	0.3006
u'	0.2197	0.2184	0.1274	0.0388	0.0780	0.3210	/	0.5326
v'	0.5029	0.0599	0.2120	0.4933	0.5758	0.5488	/	0.5185

Tabelle 6: Angaben aus der Spektralanalyse der ETC-LED-Scheinwerfer VIVID und LUSTR+. ⁸⁷

In der Tabelle sind noch einmal die Ergebnisse der Messung jedes einzelnen LED-Typs beider Scheinwerfer aufgeführt. Neben dem Maximum der einzelnen Intensitätskurven ist auch ein Vergleich der Beleuchtungsstärken in Lux aufgeführt. Die Abweichungen gleicher LED-Typen der verschiedenen Scheinwerfer lassen sich durch die unterschiedliche Anordnung der Leuchtdioden in den Gehäusen erklären. Da der Lichtkegel nicht aus einer einzelnen Lichtquelle entspringt, entstehen Intensitätsschwankungen, welche die Messung beeinflussen.

Weiterhin sind in der Tabelle die Farbwerte der CIE-Normfarbtafel 1931 und die Koordinaten der CIE-UCS-Normfarbtafel 1976 aufgeführt, die ebenfalls zu den Ergebnissen der Spektralanalyse gehören. Diese Angaben können im Anhang zusammen mit dem Farbspektrum jedes einzelnen LED-Typs noch einmal grafisch in den jeweiligen Normfarbtafeln nachvollzogen werden (dazu siehe Anhang A).

⁸⁷ Messung: Danny Hillig

5.5 Technische Parameter / Preis

Die enormen Vorteile der LED-Scheinwerfer liegen in ihrer Energiebilanz begründet. Die LED-Technologie überzeugt durch ihre Effizienz gegenüber konventionellen Leuchtmitteln wie der Halogen-Technologie, welche eine Weiterentwicklung der Glühlampe ist. Aufgrund unserer zunehmend nachhaltigen Energiepolitik und gesellschaftlichen Denkweise wird in allen technischen Bereichen nach umweltfreundlichen und effizienteren Lösungen gesucht. In der Beleuchtungsindustrie ist mit der Leuchtdiode eine nachhaltige Technologie entstanden, die mit effizienten Energiebilanzen ein großes Potential darstellt. Allerdings sind die Anschaffungskosten aufgrund der Herstellung und aufwendiger Steuerelektronik noch sehr hoch. Die Energiebilanz der getesteten LED-Scheinwerfer ist in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Vivid

Eingangsspannung	100 V	120 V	240 V
Leerlauf (W)	10.5	11	12.7
Maximal (W)	102	98	95.6
Leerlaufstrom (A)	0.135	0.098	0.078
Maximal (A)	1.12	0.82	0.403

Lustr+

Eingangsspannung	100 V	120 V	240 V
Leerlauf (W)	10.3	10.5	12.2
Maximal (W)	104	102	99.7
Leerlaufstrom (A)	0.125	0.094	0.074
Maximal (A)	1.16	0.861	0.418

Tabelle 7: Technische Angaben der LED-Scheinwerfer.⁸⁸

Mit einer Maximalleistung von nicht einmal 100 Watt arbeiten die beiden LED-ETC-Typen wesentlich energieeffizienter als der Halogen-PAR-Scheinwerfer mit 750 Watt. Der enorm hohe Strom der Halogen-Lampe von 3,125 Ampere kann gegenüber den reichlich 0,4 Ampere der mit Leuchtdioden bestückten Lampen bei einer Versorgungsspannung von 240 Volt nicht überzeugen. Durch den geringen Energieverbrauch der LED-Scheinwerfer können von diesen Typen bis zu zehn Lampen auf einem mit 16 Ampere abgesicherten Stromkreis betrieben werden.⁸⁹ Beide Scheinwerfertypen arbeiten ohne eine Lüfter-gestützte Kühlung. Beliebige optische Systeme können durch eine ähnliche Bauweise an beiden ETC-Lampen angebracht werden.

Der konventionelle, zuverlässige Halogen-Scheinwerfer überzeugt wiederum durch seinen Preis von ca. 180 Euro. Die neuartigen LED-Scheinwerfer der ETC-Selador-

⁸⁸ Vgl. ETC-Bedienungsanleitung, 2012: S.12

⁸⁹ Vgl. ETC-Bedienungsanleitung, 2012: S.10

Serie kosten mit ca. 1800 Euro das zehnfache.⁹⁰ Der hohe Preis ist mit der umfangreich verbauten Elektronik, den zahlreichen Leistungsdioden und der innovativen Technologie zu begründen.



Abbildung 18: ETC-Halogen-PAR (links) und ETC-LED-Scheinwerfer.⁹¹

5.6 Der Farbvergleich

Der Vergleich des Farbverhaltens der 3 Scheinwerfer wird aus verschiedenen Perspektiven betrachtet. Einmal wird das Verhalten zwischen LED-Lichtquelle und konventionellem Halogen-Leuchtmittel untersucht. Weiterhin werden die beiden LED-Scheinwerfer mit unterschiedlichen Farbbestückungen untereinander verglichen. Es gilt herauszufinden ob der neuartige LED-Scheinwerfer mit dem x7-Farbmischsystem nach bisherigem Stand einen erfolgreichen, technisch ausgereiften Scheinwerfer ersetzen kann.

Für die Farbauswahl wurden Farbfolien des Herstellers ROSCO verwendet, die im Theaterbetrieb regelmäßig ihren Einsatz finden und dabei einen Großteil des sichtbaren Farbspektrums abbilden sollen.

⁹⁰ Vgl. Händlerangabe: www.huss-licht-ton.de [Stand 08.06.2014]

⁹¹ http://www.huss-licht-ton.de/images/product_images/popup_images/7164_0.jpg

Es wurden folgende zehn Farben für den Vergleich ausgewählt:

ROSCO-Farbe	Beschreibung
119	Dark Blue
174	Dark Steel Blue
728	Steel Green
124	Dark Green
122	Fern Green
101	Yellow
179	Chrome Orange
156	Chocolate
110	Middle Rose
106	Primary Red

Tabelle 8: Verwendete ROSCO-Farbfiler.⁹²

Die Spektralanalyse der Farbgänge des Halogen-Scheinwerfers verdeutlicht eine weiche Verlaufskurve. Je nach Farbfiler werden bestimmte Wellenlängenbereiche mit flach abfallenden Flanken herausgefiltert. Je nach Farbauswahl, wird auch die Intensität der Halogen-Lichtquelle und damit die Intensität der abstrahlenden Wellenlängenbereiche beeinflusst. Dieser Effekt lässt sich auch in den Angaben der Beleuchtungsstärke-Messungen nachvollziehen. Die LED-Scheinwerfer zeigen im Gegensatz sehr steil-flankige Intensitätskurven. Aufgrund der monochromen Farbeigenschaften einiger Leuchtdioden sind, je nach Ansteuerung und Verwendung der einzelnen Farbtöne, oft mehrere Maxima in den Farbspektren möglich. Da diese jedoch im gesamten sichtbaren Spektrum eng beieinander liegen, entstehen keine oder nur sehr kurze Abschnitte in denen Wellenlängen des Spektrums fehlen.

Es hängt jedoch vom optischen Eindruck ab, wie stark einzelne LEDs zur Farbmischung per Fader über das Pult angesteuert werden, um den gleichen Farbeindruck zu erreichen, der durch den Halogen-Scheinwerfer mit Farbfiler hervorgerufen wird. Dadurch können sich Farbspektren unterscheiden, obwohl der Eindruck der abgebildeten Farben gleich ist. Alle Farbtöne wurden wie im folgenden Beispiel ausgemessen und grafisch dargestellt. Die grafischen Darstellungen jeder einzelnen Farbe im direkten Vergleich sind im Anhang zu finden (siehe Anhang C).

⁹² Vgl. <http://rosco.com/uk/german/filters/ecolour.cfm?sortOrder=no&displayType=36> [Stand: 12.06.2014]

Im Folgenden ist die ROSCO-Farbe 101 im direkten Vergleich dargestellt:

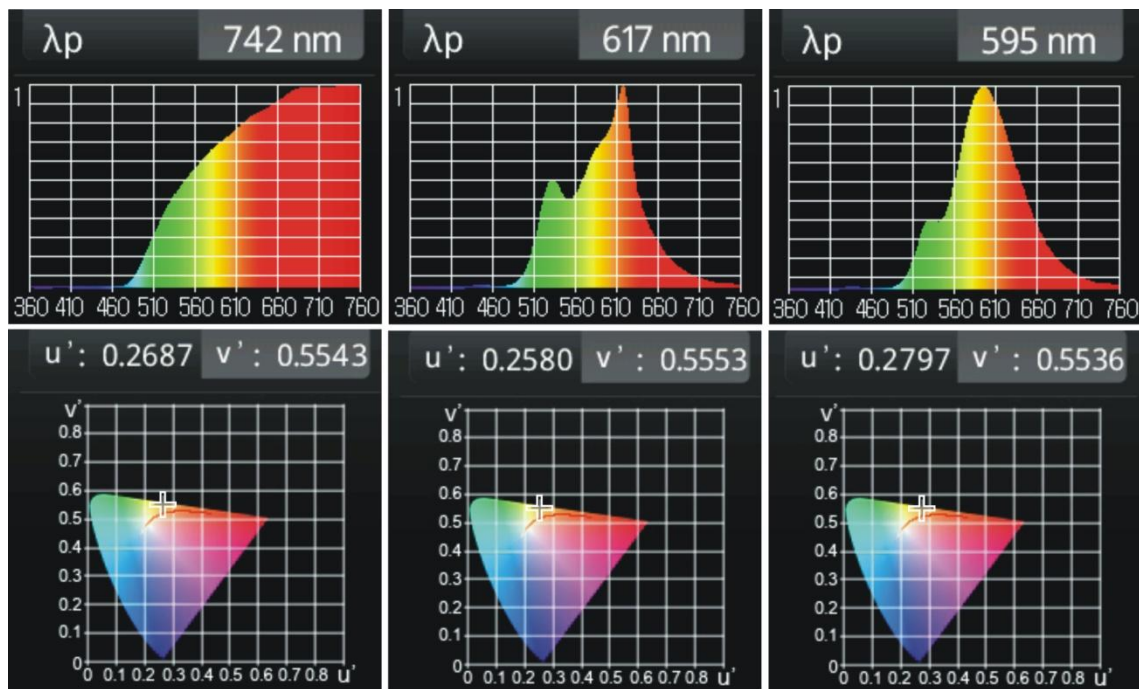


Abbildung 19: Die ROSCO-Farbe 101 im direkten Vergleich (v.r. Halogen, VIVID, LUSTR+).⁹³

Bei dieser Farbe ist zu erkennen, dass die Farborte in den CIE-UCS-1976-Diagrammen nahezu identisch sind. Der optische Farbeindruck der mit den LED-Scheinwerfern nachgebildeten ROSCO-Farbe 101 war hingegen nicht optimal und zeigte deutliche Abweichungen.

Im Spektraldiagramm ist hingegen zu erkennen, dass sich mit der Verwendung des x7-Farbmischsystems ein unterbrechungsfreier breiter Spektralgang der LED-Scheinwerfer realisieren lässt. Das Maximum der Halogen-Lichtquelle im 750nm-Bereich ist auf das natürliche Verhalten dieser Lichtquelle zurückzuführen, da Halogen-Scheinwerfer Licht bis in den für uns Menschen nicht sichtbaren Infrarotbereich ausstrahlen.⁹⁴

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Messungen der Beleuchtungsstärken in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

⁹³ Grafik: Danny Hillig

⁹⁴ Vgl. Mueller, 2008: S.137

	ROSCO				
ETC	119	174	728	124	122
Halogen	1242	15785	23366	10989	25097
VIVID	3589	12910	15111	6898	8912
LUSTR+	2464	19586	14230	8925	11906
	ROSCO				
ETC	101	179	156	110	106
Halogen	35030	24254	9752	27277	4511
VIVID	7424	5038	8336	18614	3728
LUSTR+	9537	9105	7922	22615	2209

Tabelle 9: Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessungen in lux.⁹⁵

Die weiteren Ergebnisse der Spektralanalyse der einzelnen Scheinwerfer mit verschiedenen Farben können wie folgt charakterisiert werden:

119 - Dark Blue

Das sehr dunkle Blau schluckt einen großen Teil der Lichtenergie des Halogen-Scheinwerfers. Wie in den Ergebnissen der Beleuchtungsstärke deutlich zu erkennen ist, strahlt der ETC-Scheinwerfer mit der konventionellen Lichtquelle am wenigsten intensiv. Das Ergebnis spiegelt sich auch im Spektralgang der drei Scheinwerfer wieder. Überzeugen können hier die LED-Scheinwerfer der Selador-Serie. Dabei strahlen VIVID und LUSTR+ mit gleicher Qualität lichtstärker. Die Farbe lässt sich sehr gut nachbilden und überzeugt bei beiden Typen mit einem gleichmäßigen Farbkegel. Schwache Intensitätsunterschiede sind kaum zu erkennen. Beide LED-Typen überzeugen gleichwertig und können den Halogen-PAR durchaus ersetzen. Ausführliche grafische Darstellungen sind wie auch zu den anderen Farben im Anhang (siehe Anhang B) zu finden.

174 - Dark Steel Blue

Das in der Theaterbeleuchtung oft verwendete Dark Steel Blue zeigt wie unterschiedlich die Scheinwerfer reagieren. Hier kann der LED-Scheinwerfer mit der LUSTR+ Bestückung überzeugen. Durch den Vorteil der weißen Leuchtdiode, welche hier bei der Farbmischung entscheidenden Anteil trägt, wird die Farbe authentisch wiedergegeben und die Beleuchtungsstärke verbessert. Der mit Abstand höchste Wert belegt diese Beobachtung. Mit dem VIVID-Typ lässt sich die Farbe nur sehr schlecht wiedergeben.

⁹⁵ Messung: Danny Hillig

Außerdem sind im Abbild der Lichtquelle unterschiedliche Farbbereiche zu erkennen, welche durch die unsymmetrische LED-Bestückung zu erklären sind. Der Halogen-Scheinwerfer liefert erneut ein beständiges Ergebnis, kann jedoch durch den stark überzeugen LED-LUSTR+-Scheinwerfer ersetzt werden.

728 - Steel Green

Die Nachbildung des kühlen, stählernen Grün lässt sich ebenfalls mit dem LUSTR+-Typ sehr authentisch realisieren. Da der Spektralgang, wie bei dem Halogen-ETC zu erkennen ist, sehr breitbandig ist und große Bereiche des sichtbaren Lichtspektrums abdeckt, ist wiederum die weiße LED sehr hilfreich. Der VIVID-LED-Scheinwerfer kann bei dieser Farbe nicht überzeugen und kann die herkömmliche Lichtquelle nicht ersetzen. Im Spektralgang ist bei dem VIVID-Scheinwerfer ebenso wie bei der Abbildung in den CIE-Normfarbtafeln eine größere Abweichung zu den anderen beiden Lampen zu erkennen. Mit der größten Lichtleistung kann allerdings mit einem großen Abstand nur der Halogen-Scheinwerfer überzeugen.

124 - Dark Green

Dieses dunkle Grün wird von allen drei Lichtquellen farblich nahezu identisch wiedergegeben. Die LED-Scheinwerfer können durch gleiche Bestückung und Anzahl der Leuchtdioden überzeugen und unterscheiden sich nur geringfügig aufgrund von Messabweichungen oder Toleranzen der Dioden. Der VIVID-Typ kann also ebenso wie der LUSTR+-Typ mit guter Farbwiedergabe überzeugen. Generell ist die Lichtquelle des Halogen-ETC wieder wesentlich intensiver, wie der Wert der Beleuchtungsstärke zeigt. Die Farbverläufe der Spektren gleichen sich ebenso wie die sehr eng beieinander liegenden Koordinaten der CIE-Farbdiagramme. Das verfälschte Maximum der Halogen-Lichtquelle ist auf das natürliche Strahlungsspektrum der Technologie zurückzuführen, wie im Vorfeld schon erwähnt wurde.

122 - Fern Green

Bei diesem helleren Farbton lassen sich erneut Einbußen bei dem ETC-LED-VIVID-Scheinwerfer erkennen. Obwohl sich die Maxima der beiden LED-Scheinwerfer im Farbspektrum identisch verhalten, ließen sich starke Unterschiede bei der Lichtstärke nachweisen. Der Halogen-Strahler ist mit diesem Farbton noch nicht durch die LED-Technik zu ersetzen. Die Beleuchtungsstärke ist mehr als doppelt so hoch, wie bei dem stärksten LED-Typ.

Bei der Farbwiedergabe fehlt es zudem beiden neuartigen Scheinwerfern an Gleichmäßigkeit und Kraft. Bei einer Entscheidung zwischen den mit Leuchtdioden bestückten Lampen, würde die Wahl jedoch auf den ETC-LUSTR+ fallen.

101 - Yellow

Nach der spektralen Auswertung dieser Farbe zu Beginn dieses Farbvergleichs (siehe Seite 39), folgen jetzt weitere Anmerkungen zum möglichen Einsatz der Scheinwerfer bei der Verwendung der Farbe 101. Es wird schnell deutlich, dass beide LED-Lichtquellen ein schlechtes Farbverhalten in diesem Spektralbereich aufweisen. Der Halogen-Scheinwerfer überzeugt hier durch einen gleichmäßigen Farbkegel und eine Leuchtintensität, die knapp fünfmal höher ist als die Beleuchtungsstärke des VIVID-Scheinwerfers. Wenn also Farben aus diesem Spektralbereich oft eingesetzt werden, ist von LED-Beleuchtung mit dem x7-Farbmischsystem abzuraten und auf konventionelle Lichtquellen zu setzen. VIVID- und LUSTR+-LED-Bestückung weisen beide ähnliche Schwächen auf.

179 - Chrome Orange

Ein ähnliches Verhalten ist bei diesem Chrome Orange zu sehen, wenn auch die Abweichungen im Vergleich zum Halogen-Scheinwerfer nicht so groß wie bei dem vorher untersuchten Gelb sind. Die Koordinaten in den CIE-Normfarbtafeln beweisen ebenso wie die Spektralanalyse ein sehr gutes Abbild der Leuchtdioden im Vergleich zum konventionellen ETC-PAR. Der optische Eindruck vermittelt jedoch noch einige Schwächen. Klar zu erkennen sind auch bei dieser Farbe wieder die deutlichen Leistungsreserven des Halogen-Scheinwerfers. Durch eine Bestückung mit rot-orangen LEDs des VIVID-Scheinwerfers, ist dieser dem LUSTR+-Typ vorzuziehen.

156 - Chocolate

Diese Farbe ist bei allen 3 Scheinwerfern durch ein intensitätsschwaches Lichtspektrum charakterisiert. Der Farbfilter mindert die Beleuchtungsstärke der Halogen-Lichtquelle enorm und ist auch durch die beiden LED-Typen nicht einfach nachzubilden. Ein unterbrechungsfreieres Spektrum kann auch hier der LUSTR+-LED-Typ vorweisen. Die Farbverläufe beider LED-Scheinwerfer zeigen optische Unregelmäßigkeiten und können diese Farbe nur unbefriedigend nachbilden. Durch die Option der weißen Leuchtdiode und den besseren Spektralgang sollte hier die Wahl auf den ETC-Scheinwerfer mit der LUSTR+-Bestückung fallen, wenn ein energiearmes Leuchtmittel gewünscht ist. Das farblich beste Ergebnis bietet immer noch der Halogen-ETC-PAR.

110 - Middle Rose

Erneut kann der LUSTR+-LED-Scheinwerfer mit einer sehr guten Farbwiedergabe überzeugen. Der VIVID-Typ erreicht durch die fehlende weiße LED nur ein verfälschtes Farbergebnis. Bei diesem blassen Farbton überzeugen jedoch beide neuen Scheinwerfer mit einer besseren Bilanz der Lichtausbeute im Vergleich zu den vorangegangenen Farbversuchen. Die Koordinaten der CIE-Normfarbtafeln variieren etwas. Der optische Eindruck lässt allerdings zum LUSTR+-LED-Scheinwerfer tendieren. Generell folgt die Erkenntnis, dass die weiße Leuchtdiode eine bessere Farbwiedergabe und eine gesteigerte Leistungsbilanz garantiert. Folglich ist auch bei dieser Farbe von dem VIVID-Typ abzuraten. Der LUSTR+-Scheinwerfer kann aber durchaus den Halogen-Scheinwerfer ersetzen.

106 - Primary Red

Dieses intensive Rot wird von beiden LED-Scheinwerfern sehr gut nachgebildet. Das schmalbandige Farbspektrum der verbauten roten Leuchtdiode ist dem ROSCO-Farbton sehr ähnlich. Da die Farbfolie der Halogen-Lichtquelle große Bereiche der Lichtenergie blockiert, sind die Werte der Beleuchtungsstärke-Messungen nicht so unterschiedlich. Allerdings ist beim optischen Vergleich deutlich zu erkennen, dass VIVID- und LUSTR+-Typ ein wesentlich kleineres Abbild der Lichtquelle zeigen (siehe Abbildung 19). Das ist durch die wenigen Leuchtdioden, die bei der Mischung dieser Farbe in den LED-Scheinwerfern zum Einsatz kommen zu erklären. Beim LUSTR+-Scheinwerfer leuchten lediglich sechs angesteuerte Dioden. Beim VIVID-Scheinwerfer können bis zu 14 Dioden, durch die Bestückung mit rot-orangen Leuchtdioden, zum Einsatz kommen, die allerdings nicht bei voller Intensität ihre Lichtenergie abgeben. Beide LED-Typen können den Farbton identisch nachbilden. Mit dem ETC-VIVID können Nuancen dieser Farbe zudem wesentlich feiner abgestimmt werden. Beide LED-Scheinwerfer können die Halogen-Lichtquelle ersetzen, wenn man bereit ist auf etwas Lichtenergie zu verzichten.



Abbildung 20: Intensitätsunterschiede (links: LED-ETC, rechts: Halogen-ETC).⁹⁶

5.6.2 Zusammenfassung des Farbvergleiches

Das x7-Farbmischsystem kann in vielen Fällen durch weitgehend unterbrechungsfreie Farbspektren überzeugen. Die bei der Spektralanalyse aufgenommenen Messwerte belegen eine Verbesserung der Farbwiedergabe von LED-Scheinwerfern. Fehlende Wellenlängenbereiche bei herkömmlichen LED-Lichtquellen können durch die verschiedenen Farbtypen der LED-Bestückung der Selador-Serie bis auf Ausnahmen kompensiert werden. Das große Problem der gleichmäßigen Abbildung von Farbquellen besteht durch viele einzelne Leuchtdioden weiterhin. Die beste Farbwiedergabe ist mit LED-Scheinwerfern zu realisieren, die unter anderem weiße Leuchtdioden besitzen, wie bei dem vorangegangenen Vergleich der LUSTR+-Typ beweist. Kühle Farbstimmungen sind allgemein intensiver mit LED-Scheinwerfern zu realisieren als wärmere Farbtöne. Die Begründung dieser Ergebnisse liegt in den physischen Voraussetzungen der Herstellung. Der ETC-LUSTR+-Typ konnte gegenüber dem ETC-VIVID-Typ überzeugen. Die Farben können besser wiedergegeben werden. Zudem ist man mit der LUSTR+-LED-Bestückung in der Lage flexibler zu steuern und verschiedene weiße Farbtöne zu realisieren, was im nächsten Kapitel genauer betrachtet werden soll. Generell bietet der ETC-Halogen-Scheinwerfer allerdings die stärkste Lichtleistung. Die LED-Technologie der Selador-Serie ermöglicht noch keine Angleichung (siehe Abbildung 20). Im Farbvergleich könnte der LUSTR+-LED-ETC den konventionellen ETC-PAR mit Leistungseinbußen ersetzen. Der VIVID-ETC kann hier mit ungenügenden Ergebnissen nicht überzeugen. Die Messergebnisse der Farbtemperaturmessun-

⁹⁶ Foto: Georg Meyer

gen sind bei einzelnen Farbmessungen nicht repräsentativ und werden daher nicht aufgeführt. Die Angaben zum Farbwiedergabeindex können ebenfalls nicht interpretiert werden, da diese Auskunft über das abgegebene Lichtspektrum von angestrahlten Objekten geben. Dazu ist eine von der Lichtquelle abgewandte Messung erforderlich.

5.7 Der Weißvergleich

Ein sehr wichtiges Kriterium bei dem Vergleich von Scheinwerfern ist die Betrachtung von verschiedenen Weißtönen. Die Farbe Weiß ergibt sich durch eine Mischung des gesamten Farbspektrums. Grob werden die Farbtöne in "warmweiß" und "kaltweiß" unterschieden. Kaltweißes Licht entspricht dem Tageslicht und wird in der Beleuchtungsindustrie durch konventionelle HMI-Lichtquellen künstlich erzeugt. Warmweißes Licht gleicht dem Licht einer Kerze oder einer Feuerquelle und wird durch Glühlampen oder Halogen-Lichtquellen erzeugt. Durch Farbfilter können die Farbspektren der jeweiligen Lampenarten beeinflusst werden. Durch einen sogenannten CTO-Filter erzeugt man vor einem HMI-Scheinwerfer das Leuchtverhalten einer Glühlampe. Durch einen sogenannten CTB-Filter vor einem Halogen-Scheinwerfer erhält man wiederum das Leuchtverhalten einer HMI-Lichtquelle.

Bei dem hier verwendeten ETC-Halogen-Scheinwerfer wurde ein CTB-Farbfilter für die Erzeugung der Tageslichtstimmung genutzt. Für die Erzeugung einer Glühlichtstimmung ist bei dem Halogen-PAR keine Farbfolie notwendig, da die Lichtquelle einer Glühlampe entspricht.

Im direkte Vergleich mit den LUSTR+- und VIVID-LED-Lichtquellen sind folgende Spektraldiagramme entstanden:

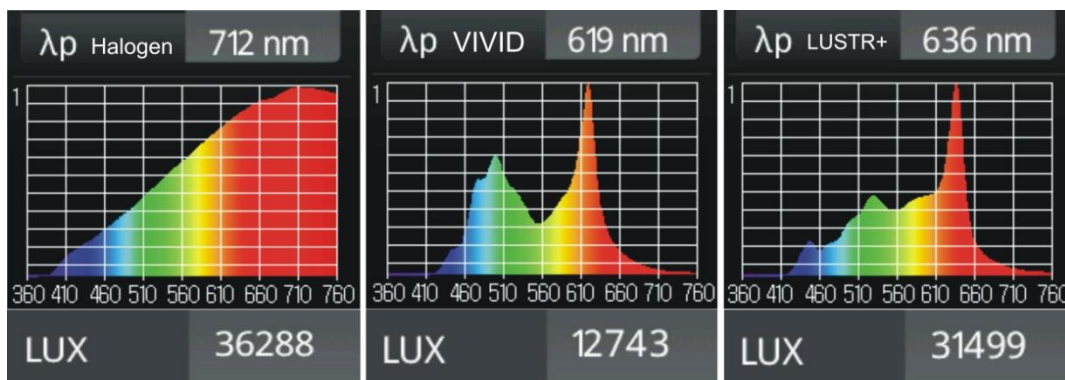


Abbildung 21: Spektralanalyse von "Warmweiß" im Vergleich.⁹⁷

⁹⁷ Grafik: Danny Hillig

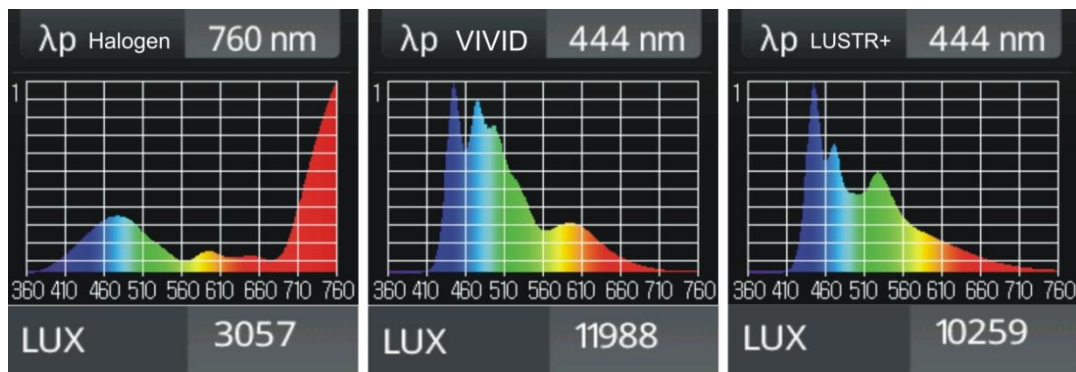


Abbildung 22: Spektralanalyse von "Kaltweiß" im Vergleich.⁹⁸

Beim direkten Vergleich der drei Lichtquellen in Bezug auf das Glühlichtverhalten (siehe Abbildung 21) kann lediglich der LUSTR+-LED-Typ gute Ergebnisse vorweisen. Die Intensität dieser Lichtquelle ähnelt bereits der Beleuchtungsstärke des Halogen-Scheinwerfers. Der VIVID-LED-Typ zeigt hingegen Probleme in der Gleichmäßigkeit der Farbwiedergabe, was auch im Diagramm des Farbspektrums zu sehen. Die Farbkurve ist wesentlich ungleichmäßiger als bei dem zweiten LED-Scheinwerfer. Einbußen im Ergebnis der Beleuchtungsstärke wecken zudem Zweifel diesen Scheinwerfer einzusetzen. Außerdem ist es mit den Leuchtdioden der Selador-Serie nicht möglich eine Halogen-Lichtquelle mit dieser Leistung als Glühlicht zu ersetzen. Zwischen den beiden LED-Typen würde die Wahl auf den ETC-LED-Scheinwerfer mit der LUSTR+-Bestückung fallen.

Auch beim "Tageslicht-Versuch" überzeugt der LUSTR+-bestückte LED-Scheinwerfer. Hier kann dieser Typ wieder durch die zusätzliche Bestückung mit weißen LEDs überzeugen. Der optische Eindruck zeigt sogar ein fast identisches Ergebnis im Vergleich zum Halogen-ETC-Par mit CTB-Farbfolie. Dieser Farbfilter vor der konventionellen Lichtquelle minimiert die Lichtenergie des Scheinwerfers enorm. Der VIVID-LED-Scheinwerfer zeigt ein ähnliches Farbverhalten wie bei dem Versuch Glühlicht zu ersetzen. Das Abbild der Lichtquelle ist ungleichmäßig. Zudem lässt sich der kühle Farbton mit dieser LED-Bestückung nicht mischen.

Die weißen Leuchtdioden des LUSTR+-LED-Scheinwerfers überzeugen im Mischverhältnis mit den anderen Dioden in der Qualität der Farbwiedergabe und der Intensität dieser Lichtquelle. Der LUSTR+-Typ kann den Halogen-Scheinwerfer als "Kaltweiß-Lichtquelle" durchaus ersetzen. Die Bilder des Versuchs und die eingetragenen Koordinaten der Normfarbtafeln sind im Anhang zu finden (siehe Anhang C).

⁹⁸ Grafik: Danny Hillig

5.8 Das Dimmverhalten

Die Ergebnisse der Messungen während eines Versuchs, der die Charakteristik der verschiedenen Scheinwerfer bei verschiedener Intensitäten beleuchten soll, sind nicht repräsentativ und werden daher in dieser Arbeit nicht vorgestellt. Zudem ist für diese Untersuchung eine aufwendigere Steuerung, wie etwa komplexere Steuerkonsolen der Firma ETC notwendig.

Es konnten jedoch einige Beobachtungen gewonnen werden und daraus lassen sich wiederum einige Kenntnisse für das Verhalten während einer Intensitätssteuerung ziehen.

Während der Halogen-Scheinwerfer auf einen externen Dimmer angewiesen ist, arbeiten die LED-Scheinwerfer mit Hilfe einer internen Intensitätssteuerung. Das ist ein großer Vorteil, da bei größeren Anlagen mit vielen Scheinwerfern Technik und damit Material eingespart werden kann. Die Leuchtdioden lassen sich gleichmäßig dimmen und zeigen ein ähnliches Verhalten wie der Halogen-PAR.

Farbänderungen und Farbfades lassen sich bei den LED-Lichtquellen einfach vom Pult aus steuern, während bei konventionellen Lichtquellen Farben per Hand getauscht werden müssen und während einer Show nicht geändert werden können.

Die Farbfades lassen sich aufgrund der vielen verschiedenen Leuchtdioden, die das gesamte Farbspektrum abdecken, wesentlich feiner steuern als bei RGB- oder RGBW-bestückten LED-Scheinwerfern. Die aufwändige Elektronik ermöglicht verschiedene Steuerprogramme, die über ein Menü am Scheinwerfer direkt angewählt werden können. Dabei können bis zu 32 Scheinwerfer über DMX-In und DMX-Thru verbunden werden.⁹⁹

Die LED-ETC-Typen überzeugen im Dimmverhalten klar gegenüber der Halogen-Lichtquelle aufgrund steuerbarer, fein abstimmbarer, gleichmäßiger Farbfades und kompakte Technik ohne externe Dimmer.

⁹⁹ Vgl. ETC-Bedienungsanleitung, 2012: S.20

6 Fazit

Die vorangegangene Arbeit hat ausführliche Ergebnisse durch die Analyse des innovativen x7-Farbmischsystems von ETC geliefert. Anhand der spektralen Vermessung der einzelnen Leuchtdioden, konnte ihr Farbverhalten grafisch dargestellt werden und somit der Nachweis der farblichen Abdeckung über dem gesamten Spektrum des sichtbaren Lichts erbracht werden. Im Farbvergleich mit einer konventionellen Lichtquelle mit verschiedenen Farbfiltern wurden Stärken und Schwächen der beiden unterschiedlich bestückten LED-Scheinwerfer herausgearbeitet. In einem separat durchgeführten Vergleich verschiedener Weißtöne zeigte sich wie auch in den Farbvergleichen, welchen Vorteil die Verwendung von weißen Leuchtdioden erbringen kann. Die Betrachtung der Energiebilanz zeigte erneut die Vorteile der LED-Technologie.

Die Abbilder der einzelnen Farbspektren zeigen oft viele Gemeinsamkeiten und unterscheiden sich nicht selten nur geringfügig. Der optische Eindruck ist nicht immer konform mit diesen Ergebnissen. Die Koordinaten der CIE-Normfarbtafeln ähneln sich sehr. Eine andere Steuerung könnte hier identische Ergebnisse liefern. Der LED-Scheinwerfer mit der LUSTR+-Bestückung überzeugt in sehr vielen Vergleichen gegenüber dem VIVID-Typ. Die weißen Leuchtdioden des LUSTR+-Scheinwerfers machen diesen Typ vielseitiger. Farben lassen sich besser darstellen. Weißtöne überzeugen durch Lichtleistung und Farbton.

Jedoch ist eine herkömmliche Halogen-Lichtquelle, wie der in dieser Arbeit verwendete ETC-PAR-Scheinwerfer, nicht so einfach durch einen solchen LED-Typ zu ersetzen. Die Farbwiedergabe ist selten so gleichmäßig wie bei einem Scheinwerfer mit nur einer starken Lichtquelle. Viele kleine Leuchtdioden können egal in welcher Anordnung in einem Scheinwerfergehäuse nicht solch einen Lichtkegel hervorrufen. Mit dem x7-Farbmischsystem wurde eine vielseitige Technologie geschaffen, die eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu RGB- oder RGBW-Mischsystemen darstellt. Gegenüber konventionellen Systemen können die LED-Scheinwerfer jedoch nicht gänzlich überzeugen. Zudem sind diese Typen mit einem zehn fachen Preis schlicht viel zu teuer.

Diese Arbeit zeigt einmal mehr das Potential der LED-Technik auf. neben der effizienten Technologie überzeugen die LED-Scheinwerfer zunehmend mit authentischen Farbkonzepten. Allerdings treibt die erforderliche umfangreiche Elektronik den Preis innovativer Beleuchtungstechnik sehr hoch. Mit dem x7-Farbmischsystem wurde ein neues Konzept auf dem Markt der LED-Systeme geschaffen, was eine erfolgreiche Weiterentwicklung bestehender Scheinwerfertypen darstellt.

Die hohen Anschaffungskosten stehen allerdings in erheblichem Widerspruch zur Fähigkeit einen Halogen-Scheinwerfer zu ersetzen. Leistungsstarke, zuverlässige, konventionelle Scheinwerfer bleiben weiterhin die erste Wahl. Wird das hier untersuchte LED-System wesentlich preisgünstiger angeboten, kann es eine Alternative darstellen.

Ein Forschungsschwerpunkt der Zukunft könnte also für dieses System in der Elektronik liegen. Da die Leuchtdioden eine bereits sehr gute Lichtausbeute besitzen, liegt in der Anordnung im Gehäuse, in Linsensystemen und in Reflektor-Technologien großes Potential für Weiterentwicklungen. Außerdem ist eine erweiterte Farbsteuerung für Systeme mit vielen verschiedenen farbigen Leuchtdioden notwendig. Eine Software, die auf allen Pultoberflächen einsetzbar ist wäre hier denkbar. Die Farbmischung könnte an einen optischen Sensor gekoppelt sein, der die Farbe der LED-Systeme an aufgenommene ROSCO-Farben anpasst.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass der Fortschritt in der Beleuchtungsindustrie durch ständig weiterentwickelte LED-Technik weiter rasant voranschreitet. Mit der in dieser Arbeit untersuchten neuartigen Technologie wurde eine Methode entwickelt, die im LED-Zeitalter ihren Platz finden wird. Die hier nachgewiesenen Schwachstellen werden behoben werden. Bis die leistungsstarke herkömmliche Lichttechnik, welche heute noch einen Großteil der kulturellen Beleuchtungstechnik ausmacht durch LED-Technik ersetzbar wird, vergehen aber mit Sicherheit noch einige Jahre.

Literaturverzeichnis

Bücher und Veröffentlichungen

Bewer, Rainer/ Steckmann Kai: Das Praxisbuch der Lichttechnik. Einführung in die professionelle Bühnenbeleuchtung. 2.Auflage. München, 2004

Burghardt, Frank: Lichttechnik für Einsteiger. Die eigene Lichtshow mit DEM professionell steuern. 4.Auflage. Aachen, 2012

Dietze, Konrad: Einsatz von LED als neue Technologie in der Fernsehstudiobeleuchtung - am Beispiel von Stufenlinsenscheinwerfern. Bachelorarbeit. Berlin, 2014

ETC: Farbmischung mit LEDs. Entscheidende Voraussetzungen für schöne und gleichzeitig funktionale Ergebnisse. Informationsblatt zum x7-Farbmischsystem. o.J.u.O. [nach 2004]

ETC: selador series by ETC. Werbeblatt von ETC zum x7-Farbmischsystem. o.J.u.O. [ca.2010]

ETC: ETC Desire Serie. D40, D40XT, D60 Benutzerhandbuch. o.O., 2012

Hammer, Norbert, Prof.Dr.: Mediendesign für Studium und Beruf. Grundlagenwissen und Entwurfssystematik in Layout, Typografie und Farbgestaltung. Berlin/Heidelberg, 2008

Hillig, Danny: Möglichkeiten von LED-Technik im Theaterbetrieb. Mini-Bachelorarbeit. Mittweida, 2013

Hinrichs, Dirk; Fa. Lithos: Elektronik Tabellen. Betriebs- und Automatisierungstechnik. Braunschweig, 2006

Jahn, Patrick: Entwicklung einer High-Power-LED-Lampe im Wohnbereich. Bachelorarbeit. München, 2012

Mueller, Jens: Handbuch der Lichttechnik. Das Kompendium für den Praktiker. Know-How für Film, Fernsehen, Theater, Veranstaltungen und Events. 4.Auflage. Bergkirchen, 2008

Internet

Bernstädt, Hunert: Wissenstransfer Veranstaltungstechnik. Der Kreislauf des Lichts. URL: http://www.hbernstaedt.de/lichttechnik_uebersicht.html [Stand: 21.05.2014]

Brandt, Wolfgang; Mail-Brandt, Maria: Johann Wolfgang von Goethe und seine Farbenlehre. URL: http://www.garten-literatur.de/Leselaube/goethe/goethe11_farbe.htm [Stand 15.05.2014]

CIE-Normfarbtafeln. URL: http://n-colorspace.cool.coocan.jp/imgData/CIE1931_F2_BKa.png [Stand: 12.05.2014] und http://n-colorspace.cool.coocan.jp/imgData/CIE1976UCS_F2a.png [Stand: 12.05.2014]

CREE: Pressemitteilung: Cree Sets New R&D Performance Record with 276 Lumen-Per-Watt Power LED. URL: <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2013/February/276-LPW> [Stand: 30.05.2014]

Gall, Dr. Ludwig: Licht. Das erste Glied in der Ursache-Wirkungskette. URL: <http://www.farbmetrik-gall.de/wasist/licht/index.html> [Stand: 15.04.2014]

Härter, Hendrik: Cree kanckt die 200 lm/W in der Allgemeinbeleuchtung. URL: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/opto/articles/392504/> [Stand: 21.05.2014]

Huss - Licht & Ton: Abbildungen/Preise für ETC-Technik. URL: www.huss-licht-ton.de [Stand: 14.06.2014]

Kalaidos Fachhochschule Schweiz: Sehen. Das Auge. URL: <http://www.dma.ufg.ac.at/assets/16457/intern/retina.jpg> [Stand: 11.04.2014]

Karberg, Sascha: Sehen. Von Stäbchen und Zapfen. URL: <http://dasgehirn.info/wahrnehmen/sehen/von-staebchen-und-zapfen> [Stand: 07.05.2014]

Kraft, Carsten: Wie funktionieren LED Leuchtdioden? URL: <http://www.techuni.de/technologie/wie-funktionieren-led-leuchtdioden/> [Stand: 02.06.2014]

LUXANDO, Alles über Licht: Leuchtdioden. Technik und Anwendung. URL: http://luxando.de/wp-content/uploads/2012/07/450px-LED_5mm_green_de.svg.png [Stand: 19.05.2013]

Müller, Thomas: LED-Technologie, Teil 2. Die physikalischen Eigenschaften des Lichts. URL: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/opto/articles/256261/index4.html> [Stand: 12.05.2014]

Münchener Mineralfreunde e.V., Arbeitsgruppe Mineralogie: Was ist Licht im physikalischen Sinne? URL: <http://www.mineralienfreunde.de/AGM/013.pdf> [Stand: 05.05.2014]

OSRAM GmbH: Die Lichtfarben der LED. URL: http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lichtfarben/index.jsp [Stand: 04.05.2014]

ps, printsolution: RGB - Rot, Grün, Blau. URL: http://blog.printsolution-gmbh.de/wp-content/uploads/2012/11/Farbmischung_addi.jpg [Stand: 09.05.2014]

ROSCO: E-Colour+Filter. URL: <http://rosco.com/uk/german/filters/ecolour.cfm?sortOrder=no&displayType=36> [Stand: 12.06.2014]

Schmelzer, J.Thomas: Licht & Auge. Licht. URL: http://www.color-security.de/html/licht___auge.html [Stand: 15.04.2014]

Seilnacht, Thomas: Licht. Wie entsteht Licht und was ist es?. URL: <http://www.seilnacht.com/Lexikon/Licht.htm#> [Stand: 20.04.2014]

Soda-Light Blog: Farbtemperatur. URL: http://blog.soda-light.de/wp-content/uploads/2012/04/Farbtemperatur_Skala.jpg [Stand: 13.05.2014]

Unzner, Norbert: Lichtanalyse in der Beleuchtungstechnik. URL: http://www.bs-ballasts.com/Workshop/N_Unzner/PDF/Lichtanalyse.pdf [Stand: 30.05.2014]

UPRtek: Bedienungsanleitung des MK350N LED METER. URL: <http://www.uprtek.com/DB/uploads/PDF/user%20manual-MK350-en.pdf> [02.06.2014]

Wir sind heller, WSH GmbH: Farbtemperatur (Kelvin) URL: <http://www.wirsindheller.de/Farbtemperatur-Kelvin.45.0.html> [Stand: 13.05.2014]

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.: Die Geschichte der LED. URL: <http://www.licht.de/de/trends-wissen/licht-specials/led-das-licht-der-zukunft/die-lichtquelle-led/geschichte-der-led/> [Stand: 31.05.2014]

Bilder / Grafiken

Hillig, Danny: Bearbeitung der Grafiken der Spektralanalyse/Messergebnisse. 2014

Meyer, Georg: Fotos/Dokumentation des Versuches zur Untersuchung des x7-Farbmischsystems. 2014

Anhangverzeichnis

Anhang A: Farbwerte der einzelnen LED-Typen.....	XIV
Anhang B: Grafiken der einzelnen Farbvergleiche.....	XVI
Anhang C: Grafiken/ Fotos des Weißvergleichs.....	XXI
Anhang D: Spektralvergleich RGB/x7-Farbmischsystem.....	XXIII

Anhang

Anhang A: Farbwerte der einzelnen LED-Typen

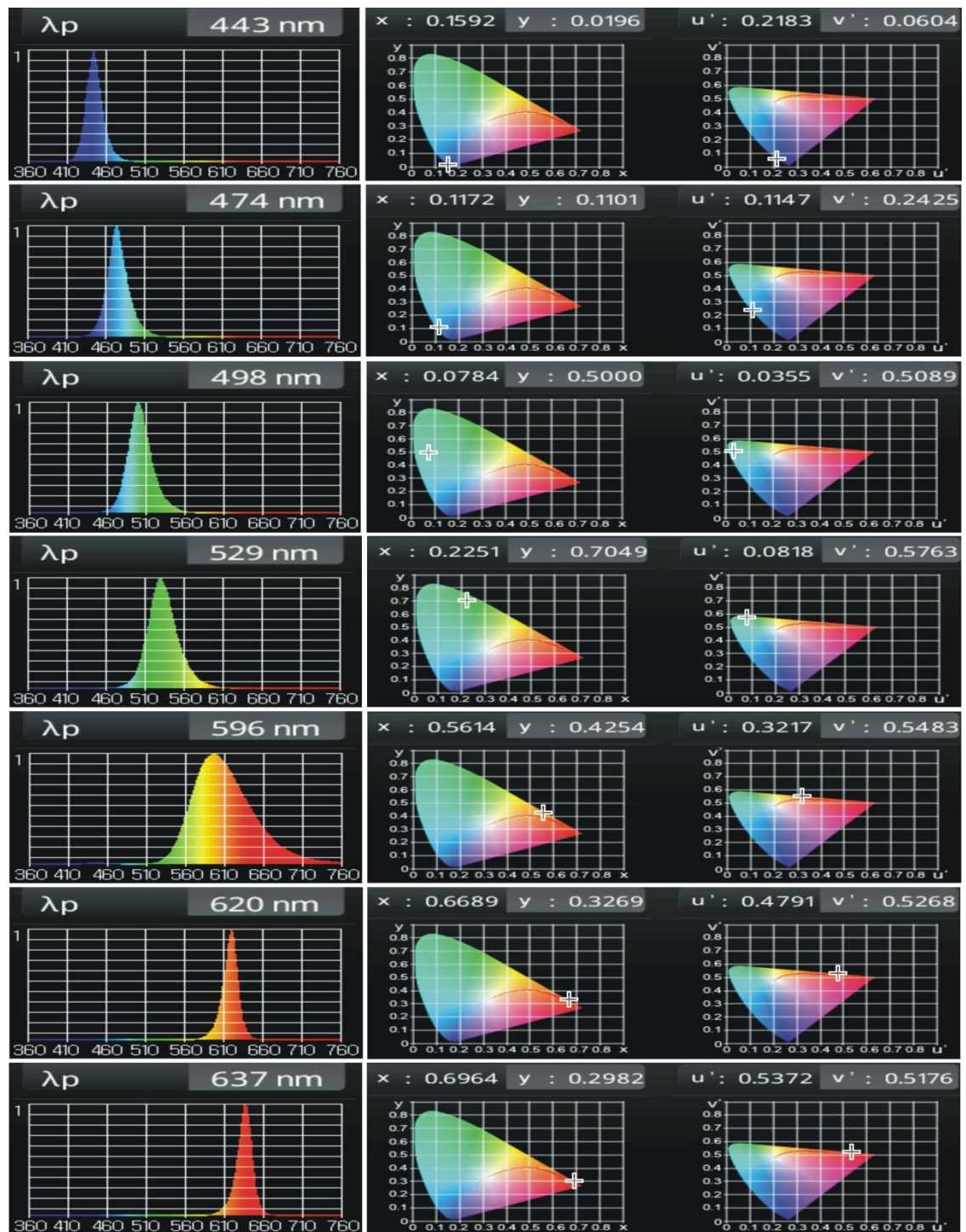


Abbildung 23: Farbwerte/Farborde der LEDs der VIVID-Bestückung.¹⁰⁰

¹⁰⁰ Grafik: Danny Hillig

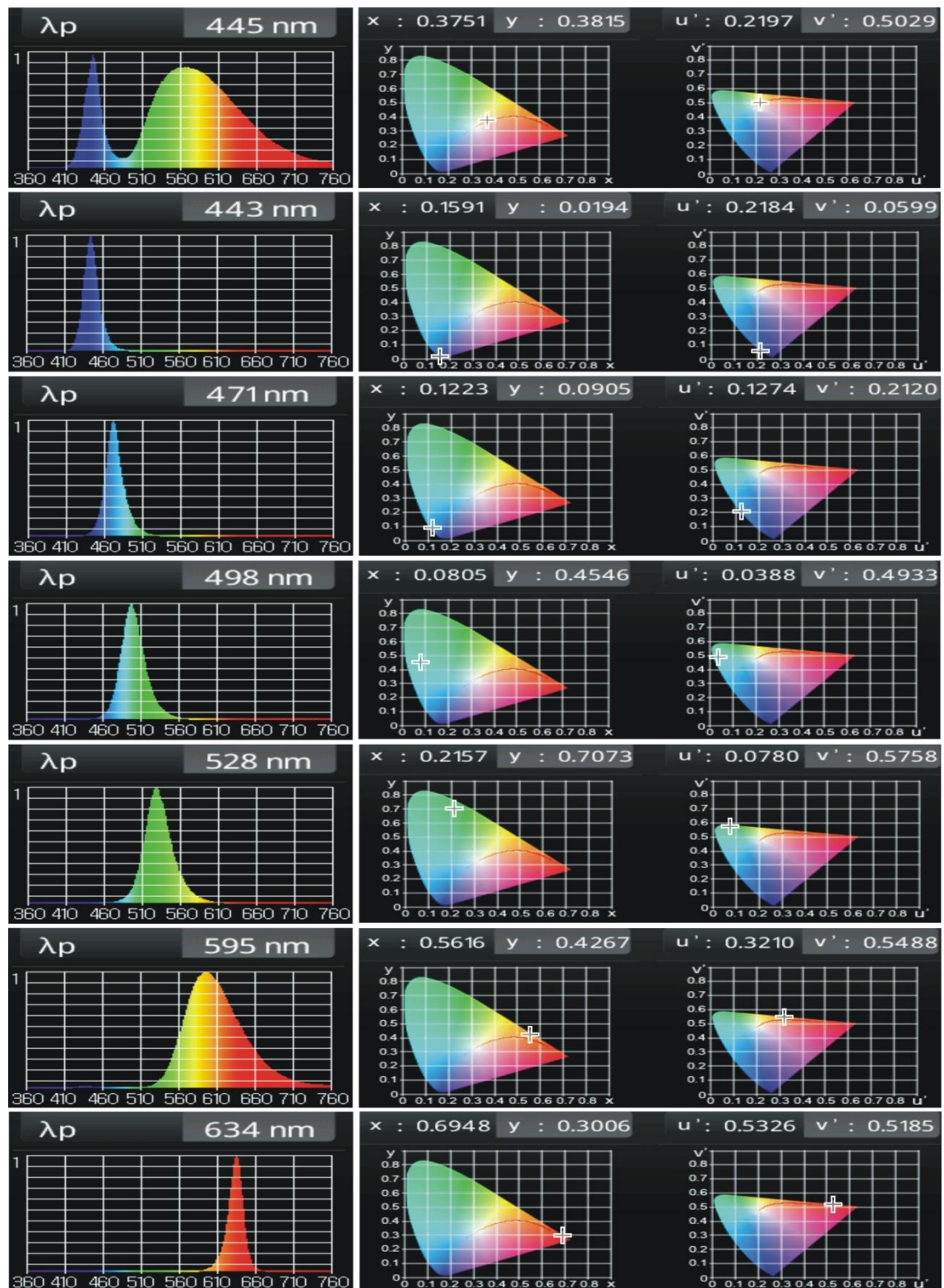


Abbildung 24: Farbwerte/Farborte der LEDs der LUSTR+-Bestückung.¹⁰¹

¹⁰¹ Grafik: Danny Hillig

Anhang B: Grafiken der einzelnen Farbvergleiche

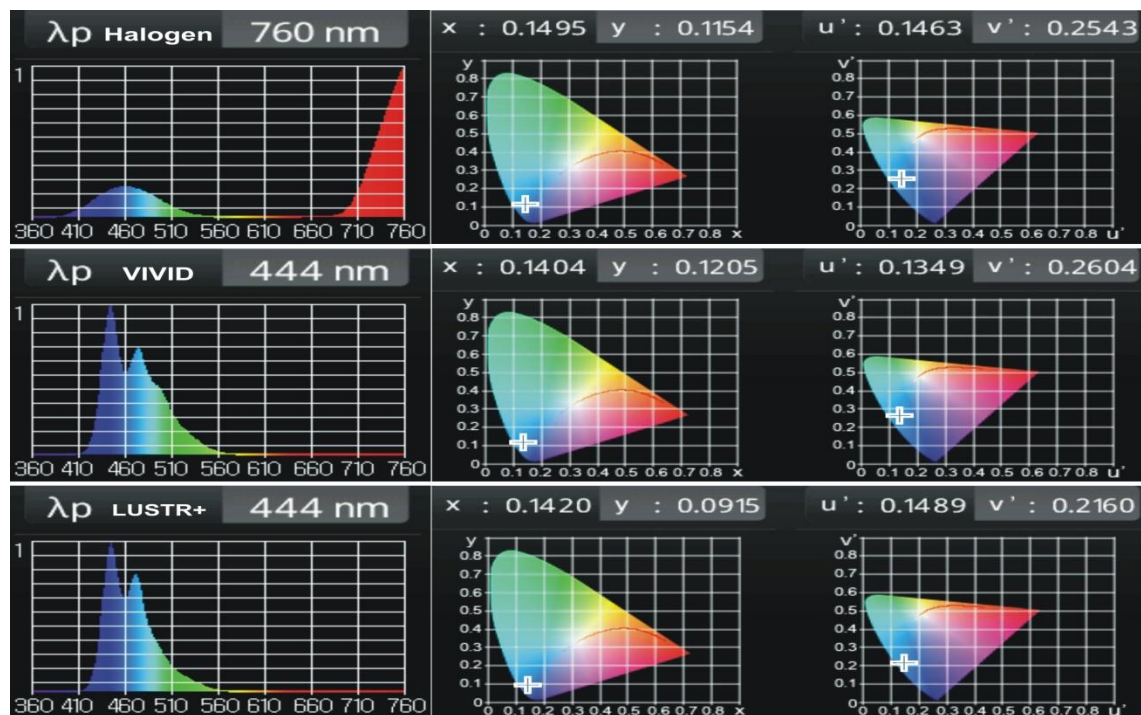
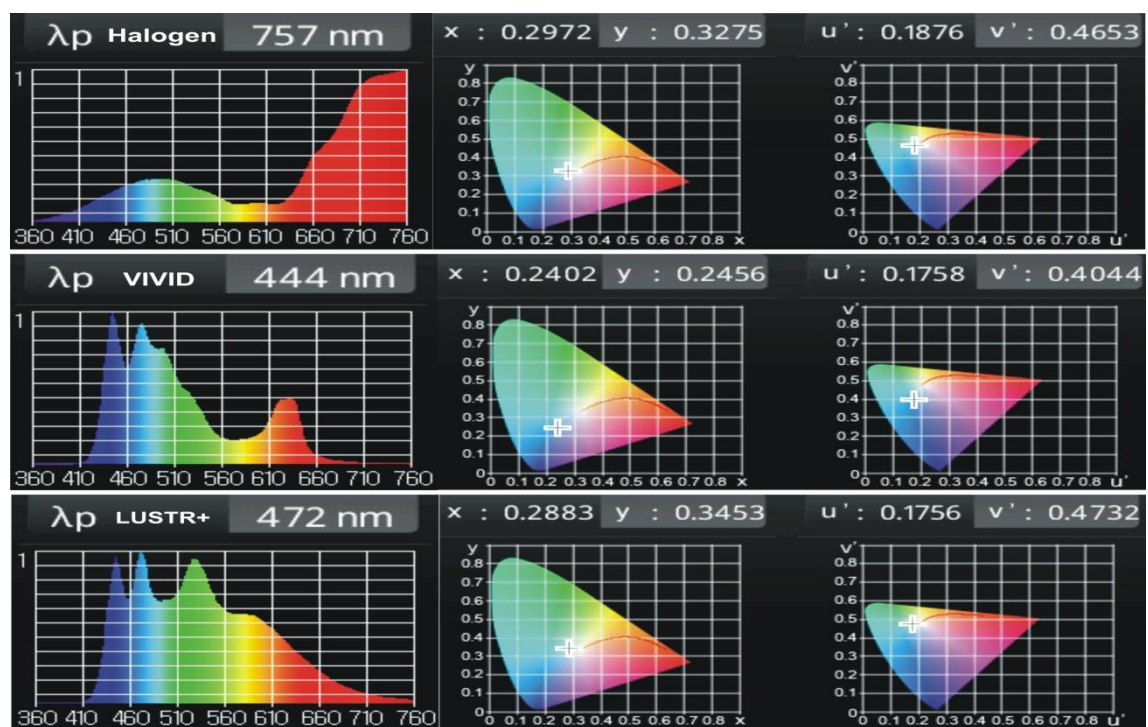
Abbildung 25: Farbvergleich von ROSCO 119.¹⁰²

Abbildung 26: Farbvergleich von ROSCO 174.

¹⁰² Grafik: Danny Hillig (wie auch alle Folgenden)

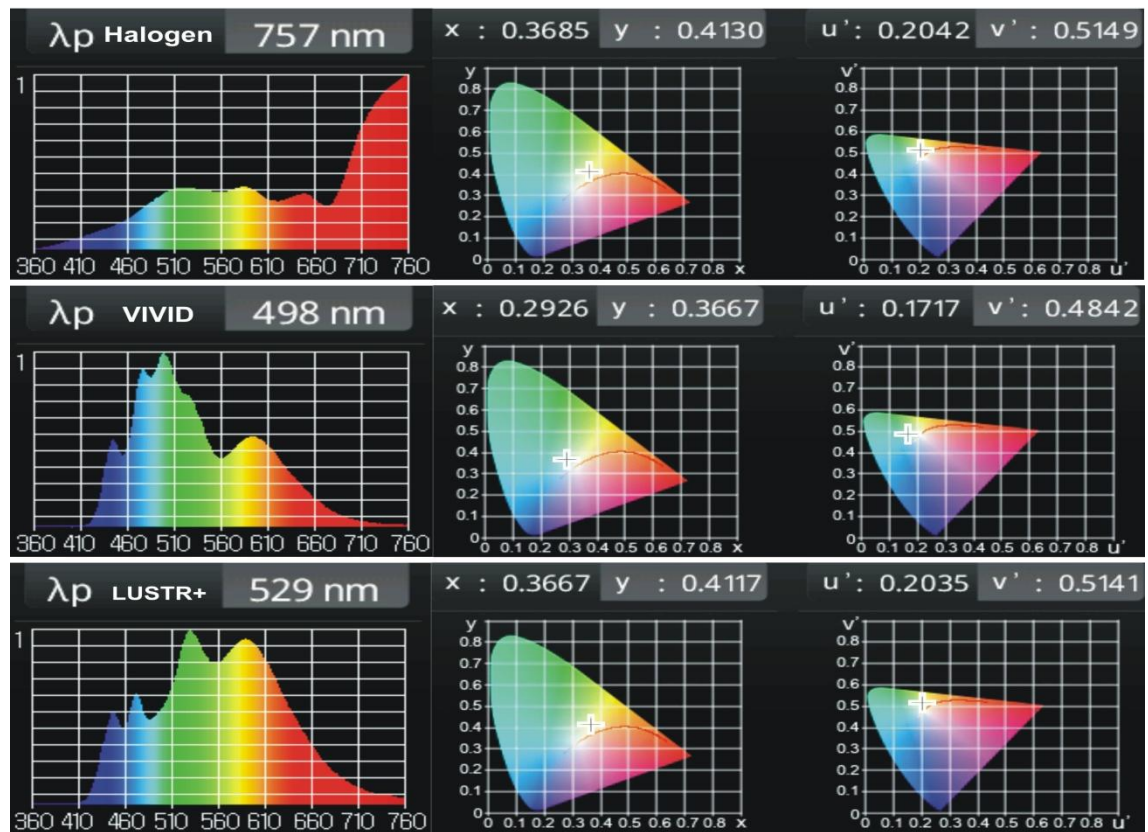


Abbildung 27: Farbvergleich von ROSCO 728.

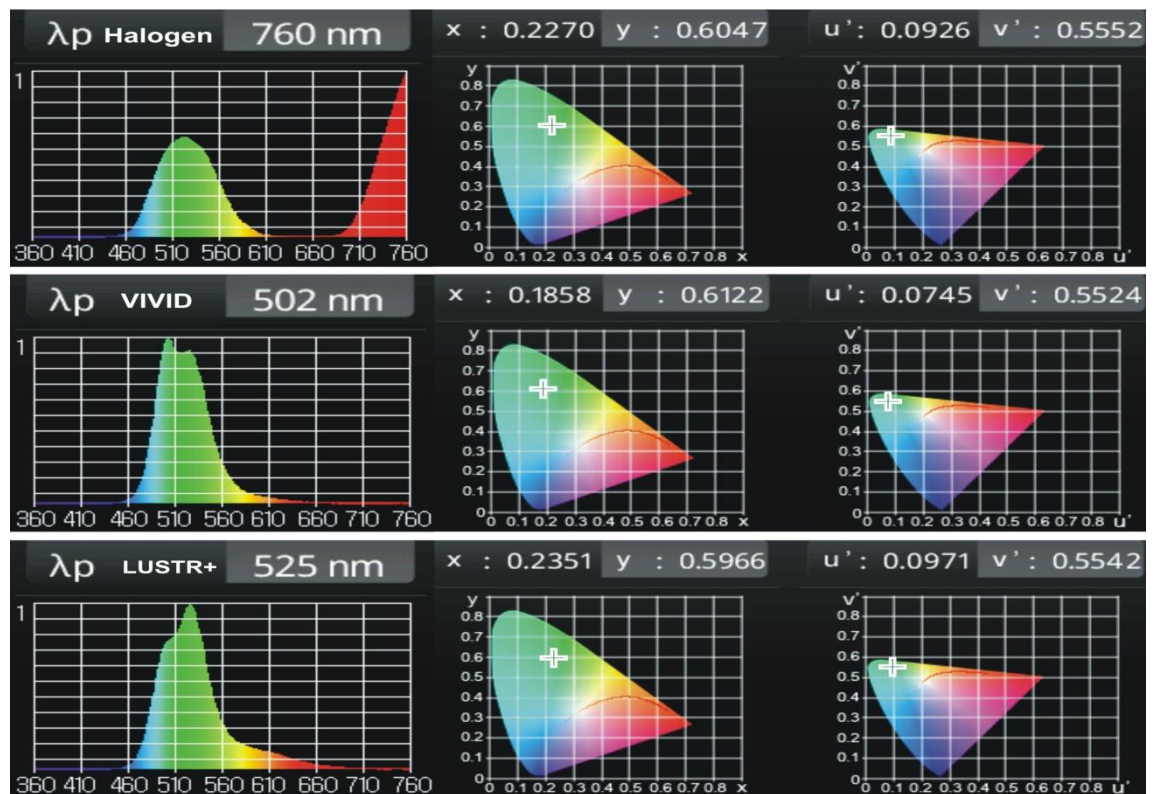


Abbildung 28: Farbvergleich von ROSCO 124.

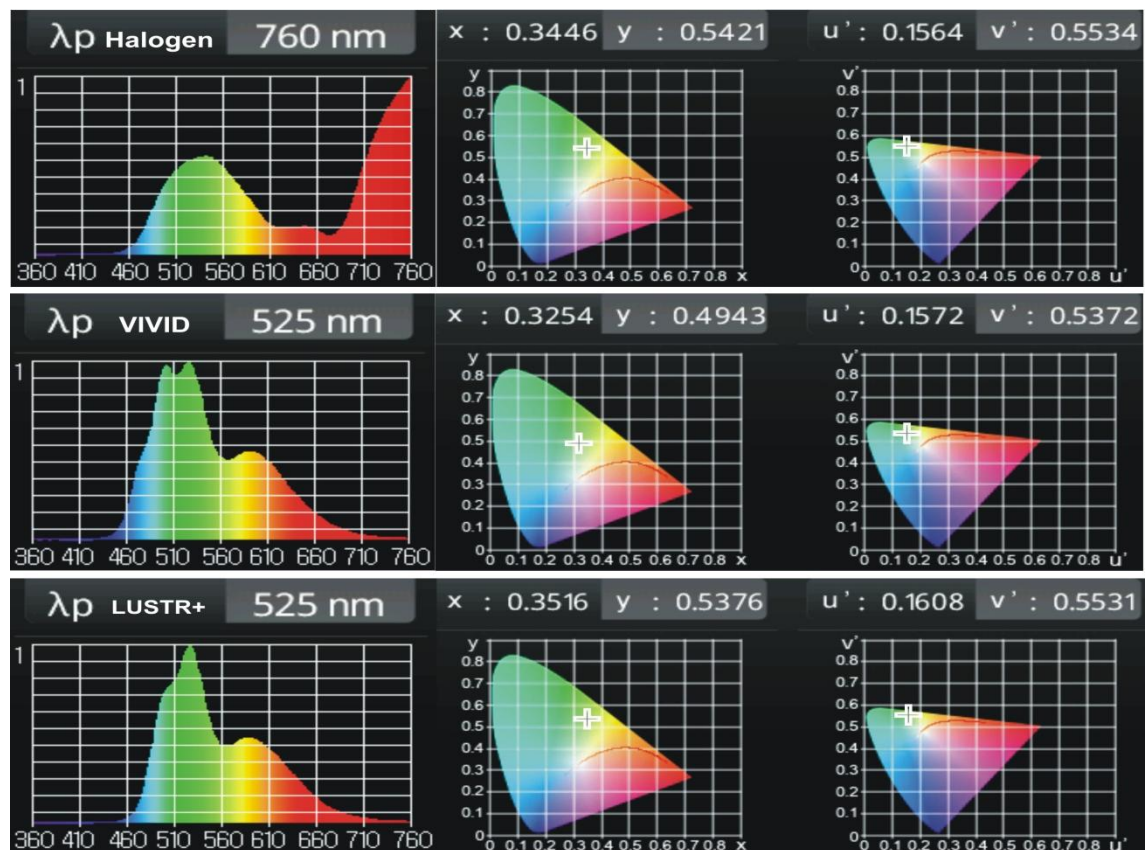


Abbildung 29: Farbvergleich von ROSCO 122.

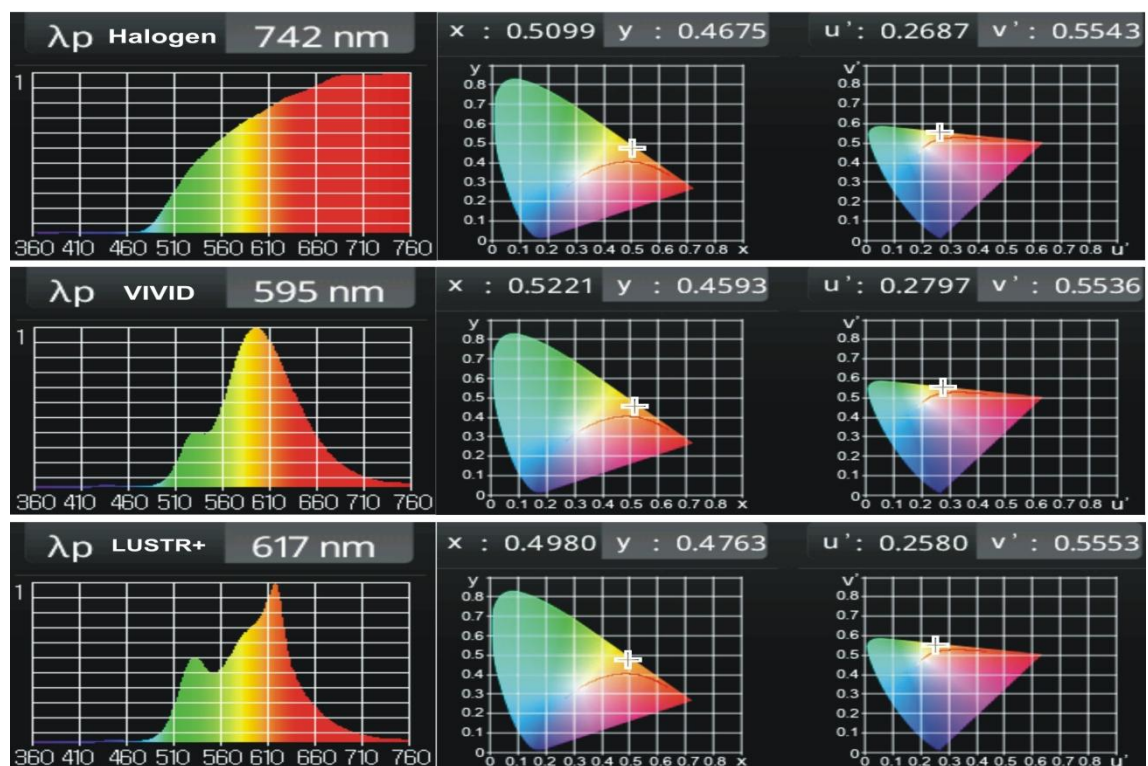


Abbildung 30: Farbvergleich von ROSCO 101.

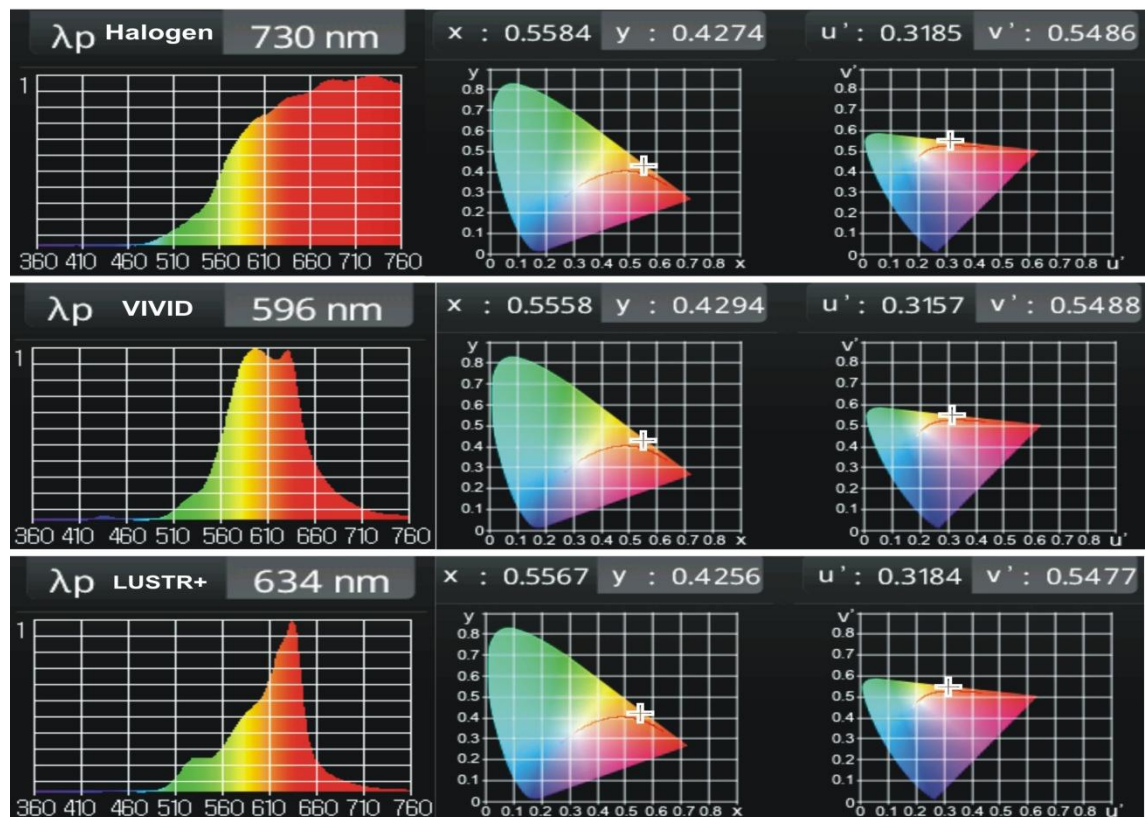


Abbildung 31: Farbvergleich von ROSCO 179.

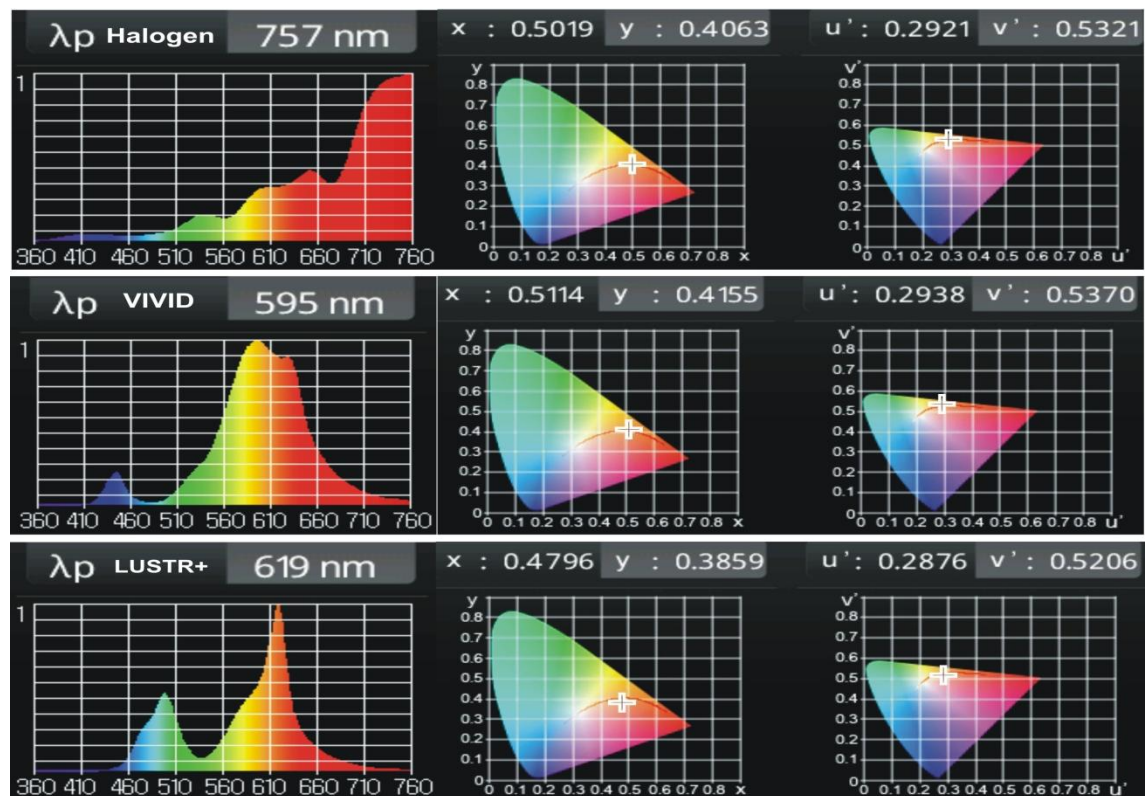


Abbildung 32: Farbvergleich von ROSCO 156.

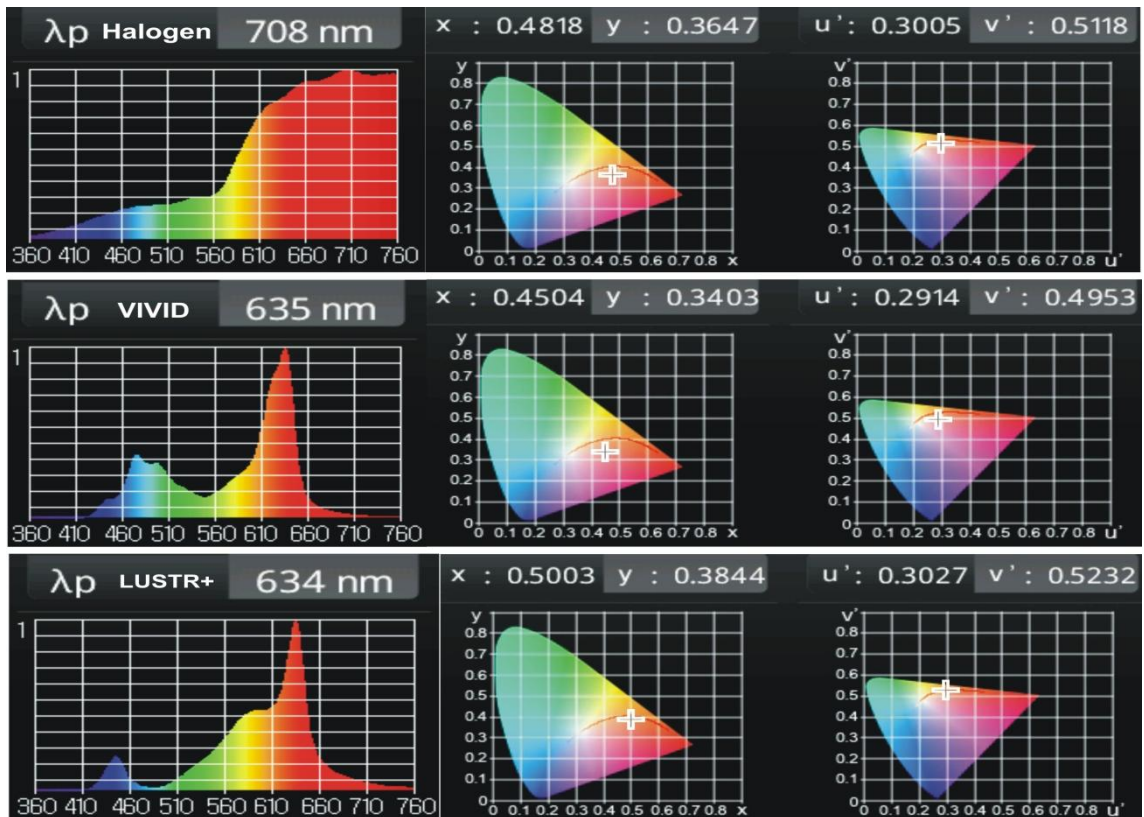


Abbildung 33: Farbvergleich von ROSCO 110.

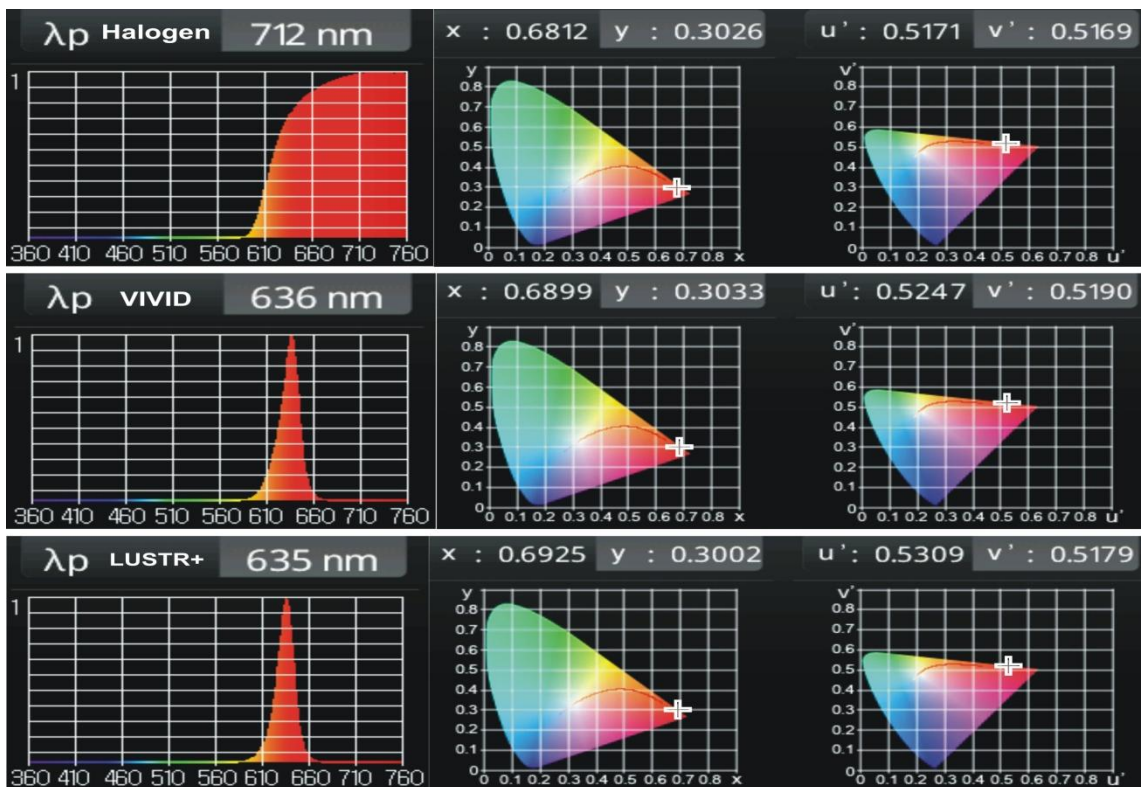


Abbildung 34: Farbvergleich von ROSCO 106.

Anhang C: Grafiken/ Fotos des Weißvergleichs

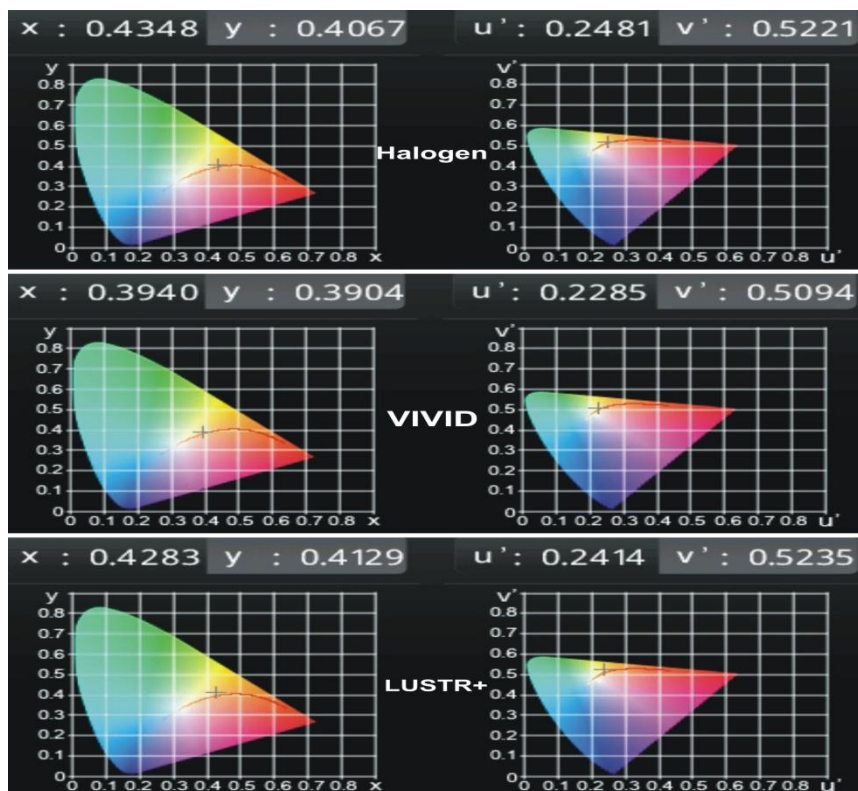


Abbildung 35: CIE-Normfarbtafeln des "Warmweiß-Vergleichs".

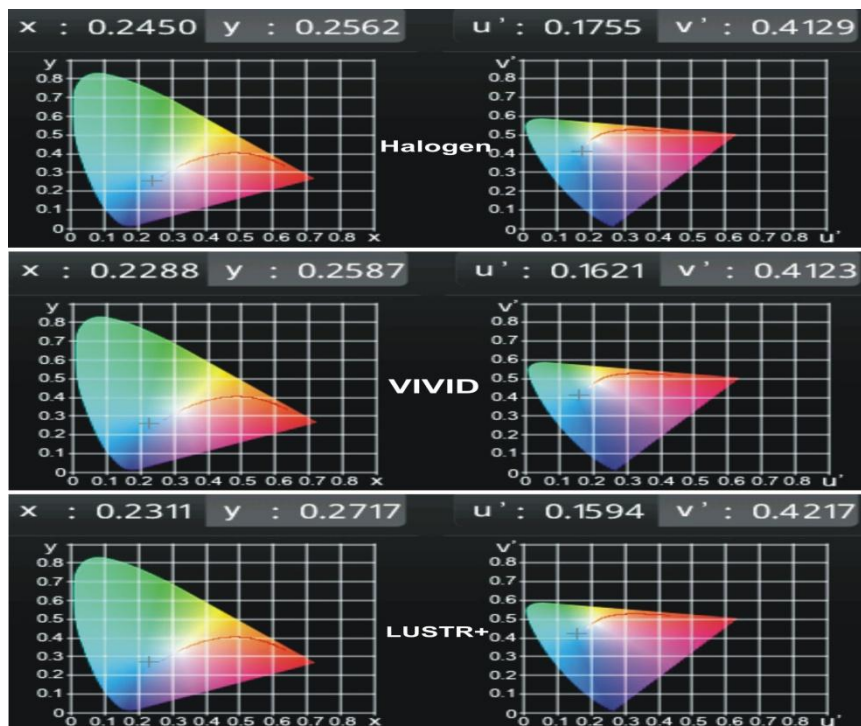


Abbildung 36: CIE-Normfarbtafeln des "Kaltweiß-Vergleichs".



Abbildung 37: Der "Kaltweiß-Vergleich" von VIVID-ETC (links) und Halogen-ETC.¹⁰³



Abbildung 38: Der "Kaltweiß-Vergleich" von LUSTR+-ETC (links) und Halogen-ETC.¹⁰⁴

¹⁰³ Foto: Georg Meyer

¹⁰⁴ Foto: Georg Meyer

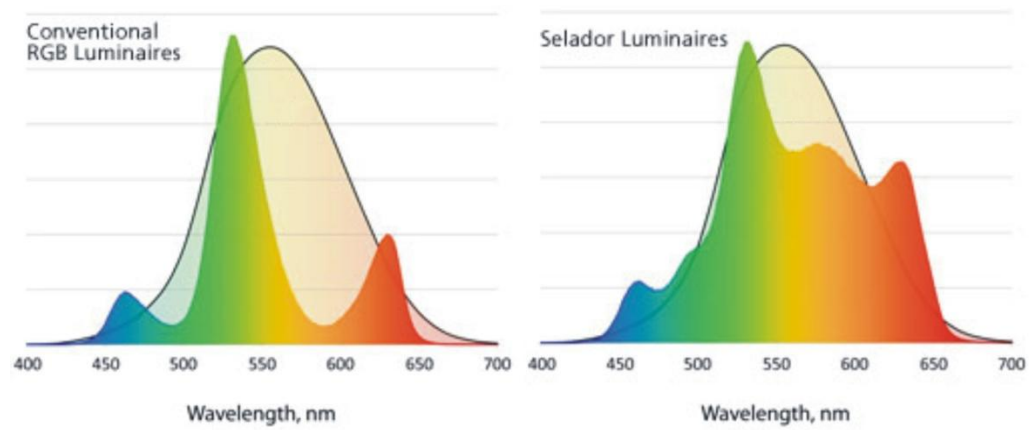
Anhang D: Spektralvergleich RGB/x7-Farbmischsystem

Abbildung 39: Vergleich der Spektren des RGB- und des x7-Farbmischsystems.¹⁰⁵

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname